

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

EFEITOS DE INSTALAÇÃO DE PAREDES MOLDADAS
NO TERRENO

Ana Sofia Carvalho Machado
(Licenciada em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção de Grau de Mestre em Engenharia
Civil - Ramo de Estruturas e Geotecnia
pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

Júri

Presidente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Vogais: Professor Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo
Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra

Lisboa
2010

Agradecimentos

A autora gostaria de expressar o seu sincero agradecimento a todos os que directa ou indirectamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao seu orientador, Professor Doutor Nuno Guerra agradece o empenho e dedicação durante a orientação e correcção do trabalho, e a sua disponibilidade no esclarecimento de dúvidas e disposição para ensinar e transmitir conhecimento.

Ao Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Nova de Lisboa, agradece a disponibilização das instalações e do equipamento informático para realização do trabalho. À Professora Doutora Teresa Santana, agradece a ajuda na organização e estruturação do método de trabalho, assim como o apoio e o incentivo. Às funcionárias do Departamento de Engenharia Civil, Maria da Luz e Carla, agradece a simpatia e a ajuda nos assuntos administrativos.

À colega, Engenheira Cláudia Josefino agradece a partilha da sua experiência na utilização de programas de cálculo e de texto, assim como o importante apoio prestado durante realização deste trabalho.

À Engenheira Ana Quintela e à Engenheira Teresa Silva a autora agradece a pronta disponibilidade para as revisões de texto de última hora.

À família agradece o constante incentivo e motivação, especialmente à mãe, Rosa, e ao namorado, David, agradece a sua compreensão face a uma menor disponibilidade e o seu incondicional apoio, assim como o incentivo e à coragem durante todo o processo de desenvolvimento do trabalho.

Resumo

Na modelação das paredes moldadas despreza-se, em geral, os efeitos da sua instalação no meio envolvente. Considera-se frequentemente para a modelação do seu comportamento que, na situação inicial, a estrutura de suporte se encontra já instalada, avaliando-se apenas os deslocamentos e as alterações de tensão no maciço, provenientes das fases construtivas posteriores.

No presente trabalho procura-se avaliar os efeitos da instalação de paredes moldadas no terreno, através de recolha de elementos bibliográficos sobre esta matéria e de simulação numérica, dando particular ênfase aos efeitos tridimensionais.

Analisa-se os efeitos da execução de um painel de parede moldada isolado e de um conjunto de painéis construídos sequencialmente, nos deslocamentos e na alteração do estado de tensão do maciço. Realiza-se uma análise paramétrica em que se estuda o efeito do estado de tensão inicial, da largura da parede e da sua espessura, concluindo-se da importância destes factores.

Abstract

Common design practice for diaphragm walls usually neglects the construction process in itself. The behavior models most commonly used assume that the retaining structure is already *whished in place* and that the consideration of the wall causes no displacements or changes in the ground.

The aim of this dissertation is to elevate the effects associated with the construction process of diaphragm walls. To do so, a literature review on this subject was carried out, followed by the study of a diaphragm wall using numerical analysis. Special attention was given to three-dimentional effects.

Displacements and changes in soil stresses due to the construction of an isolated diaphragm wall panel and a set of panels built sequentially are analysed. A parametric analisys was also carried to assess how the inical soil stresses, the width of the wall and its thickness may affect the affaired results.

Simbologia

a	comprimento total do modelo $[L]$
b	largura total do modelo $[L]$
c	altura total do modelo $[L]$
c'	coesão em tensões efectivas $[FL^{-2}]$
c_a	adesão $[FL^{-2}]$
c_u	resistência ao corte não drenada $[FL^{-2}]$
c_{inc}	incremento de resistência ao corte não drenada $[FL^{-3}]$
c_{ref}	resistência ao corte não drenada de referência $[FL^{-2}]$
d	deslocamento $[L]$
dx	deslocamento horizontal na direcção do eixo X $[L]$
dy	deslocamento vertical na direcção do eixo Y $[L]$
dz	deslocamento horizontal na direcção do eixo Z $[L]$
e	espessura do painel $[L]$
z	profundidade $[L]$
z'	profundidade $[L]$
A	Área $[L^2]$
E	módulo de elasticidade $[FL^{-2}]$
E_{ref}	módulo de elasticidade de referência $[FL^{-2}]$
E_{inc}	incremento do módulo de elasticidade de referência $[FL^{-3}]$
H	altura de escavação $[L]$
h	altura do painel $[L]$
h_c	altura crítica $[L]$
K_0	coeficiente de impulso em repouso

K_0^{TT}	coeficiente de impulso em repouso em tensões totais
L	comprimento do painel $[L]$
R_{inter}	parâmetro que relaciona c_a com c_u
y_{ref}	cota de referência $[L]$
z	profundidade $[L]$
δ_i	ângulo de atrito entre o solo e a parede $[^\circ]$
δ_h	deslocamento horizontal $[L]$
$\delta_{h_{max}}$	deslocamento horizontal máximo $[L]$
δ_v	deslocamento vertical $[L]$
$\delta_{v_{max}}$	deslocamento vertical máximo $[L]$
ϕ'	ângulo de atrito $[^\circ]$
γ	peso volúmico do solo $[FL^{-3}]$
γ_B	peso volúmico do betão $[FL^{-3}]$
γ_{lb}	peso volúmico da lama bentonítica $[FL^{-3}]$
γ_{sat}	peso volúmico do solo saturado $[FL^{-3}]$
γ_{unsat}	peso volúmico do solo não saturado $[FL^{-3}]$
γ_W	peso volúmico da água $[FL^{-3}]$
ν	coeficiente de Poisson
σ_{lb}	pressão devido à aplicação de bentonite $[FL^{-2}]$
σ_B	pressão devido à aplicação de betão $[FL^{-2}]$
ψ	ângulo de dilatação do solo $[^\circ]$
Δ_H	variação do δh_{max} $[L]$
Δ_V	variação do δv_{max} $[L]$

Índice de Matérias

1	Introdução	1
2	Estado da Arte	5
2.1	Introdução	5
2.2	Modelação do procedimento construtivo da parede	6
2.2.1	Escavação da vala e colocação das lamas bentoníticas	7
2.2.2	Betonagem do painel	7
2.2.3	Endurecimento do betão	8
2.2.4	Modelo simplificado	8
2.3	Modelação e instrumentação da execução de paredes moldadas	8
2.3.1	Procedimentos de modelação	9
2.3.2	Processos de transferência de tensões e mecanismos de deformação durante a construção de paredes moldadas	10
2.3.3	Deformação do maciço durante a construção da parede	13
2.3.4	Estudos paramétricos do problema	14
2.4	Modelação de contenções flexíveis escoradas	15
2.4.1	Procedimentos de modelação	15
2.4.2	Análise dos casos estudados	18
2.5	Conclusões	19
3	Efeitos bidimensionais da execução de paredes moldadas no terreno	21
3.1	Introdução	21
3.2	Descrição detalhada dos modelos <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	22
3.3	Exemplo de aplicação do modelo <i>WIM</i>	23

3.3.1	Geometria do problema	23
3.3.2	Características dos materiais e condições iniciais	24
3.3.3	Descrição e faseamento construtivo	25
3.3.4	Resultados obtidos e análise comparativa	25
3.4	Análise paramétrica das tensões iniciais	27
3.4.1	Resultados obtidos e análise comparativa	28
3.5	Comparação dos modelos <i>WIP</i> e <i>WIM</i> quando aplicados à modelação de uma contenção escorada	30
3.5.1	Considerações iniciais	30
3.5.2	Descrição e faseamento construtivo	32
3.5.3	Resultados obtidos e análise comparativa	35
3.6	Conclusões	39
4	Efeitos tridimensionais da execução de paredes moldadas no terreno	41
4.1	Introdução	41
4.2	Reprodução do estudo bidimensional num caso <i>3D</i>	41
4.2.1	Malha de elementos finitos e considerações gerais da modelação	42
4.2.2	Resultados obtidos e análise comparativa	42
4.3	Aplicação do modelo <i>WIM</i> a um caso de um painel com 5 m de comprimento	44
4.3.1	Optimização da malha de elementos finitos tridimensional	45
4.3.2	Aplicação do modelo obtido: faseamento	48
4.3.3	Resultados: análise da alteração do estado de tensão do maciço du- rante a instalação da parede	50
4.3.4	Resultados: análise dos deslocamentos horizontais e assentamentos do maciço	55
4.3.5	Análise comparativa	59
4.4	Aplicação do modelo <i>WIM</i> a um caso de uma parede moldada constituída por 8 painéis com 5 m de comprimento	60
4.4.1	Considerações iniciais	60
4.4.2	Resultados: alteração do estado de tensão no maciço durante a insta- lação da parede	61
4.4.3	Resultados: análise dos deslocamentos do maciço	67

4.5	Conclusões	74
5	Estudo Paramétrico	77
5.1	Introdução	77
5.2	Definição do problema base e das análises efectuadas	77
5.3	Influência do estado de tensão inicial do maciço	78
5.3.1	Aplicação do estudo da influência do estado inicial do terreno a um maciço constituído pelo Solo 1	79
5.3.2	Aplicação do estudo da influência do estado inicial do terreno a um maciço constituído pelo Solo 2	95
5.3.3	Conclusões	100
5.4	Influência da largura da parede	105
5.4.1	Solo 1, com $K_0 = 1,5$	105
5.4.2	Solo 2 com $K_0 = 0,7$	112
5.4.3	Conclusões	119
5.5	Influência da espessura da parede	121
5.5.1	Solo 1	121
5.5.2	Solo 2	122
5.5.3	Conclusões	126
5.6	Conclusões	126
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros	127
6.1	Conclusões	127
6.2	Desenvolvimentos futuros	129
	Referências Bibliográficas	131

Índice de Figuras

1.1	Fases de construção de uma parede moldada no terreno (Sousa et al., 2006).	2
2.1	Deformação dos modelos <i>WIP</i> (à esquerda; figuras (a) e (c)) e <i>WIM</i> (à direita; figuras (b) e (d)) durante as fases inicial e intermédia da escavação.	6
2.2	Diagramas de pressões aplicadas na fase de instalação da parede moldada.	7
2.3	Designações das dimensões do modelo e da parede moldada.	10
2.4	Exemplos de malhas de elementos finitos utilizadas pelos autores referidos no Quadro 2.1.	11
2.5	Processo de transferência de carga, horizontal e vertical, para um painel (Ng et al., 1995).	12
2.6	Volume de influência dos mecanismos de transferência de carga na proximidade do painel (Ng e Yan, 1998).	12
2.7	Esquema com parte da sequência de escavação do maciço suportado por uma parede moldada e escorada.	16
3.1	Geometria do modelo da parede moldada (unidades em metros).	23
3.2	Malha de elementos finitos do problema bidimensional, modelado com o <i>Plaxis 2D</i>	24
3.3	Pressões aplicadas na vala.	25
3.4	Comparação dos deslocamentos e assentamentos entre as duas modelações, nas Fases 1 e 2 da instalação da parede.	26
3.5	Tensões totais médias no maciço ao longo da instalação da parede.	27
3.6	Comparação dos resultados obtidos nos dois cálculos para o deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e para o assentamento da superfície do maciço, durante as duas fases de instalação da parede.	29
3.7	Geometria do modelo da parede moldada e escorada.	31

3.8	Malha de elementos finitos dos modelos da parede moldada e escorada, <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	31
3.9	Faseamento construtivo do modelo <i>WIP</i>	34
3.10	Início do faseamento construtivo do modelo <i>WIM</i>	35
3.11	Deslocamentos horizontais e assentamentos do modelo <i>WIP</i>	35
3.12	Deslocamentos horizontais e assentamentos do modelo <i>WIM</i>	37
3.13	Comparação entre o modelo <i>WIM</i> e <i>WIP</i> para os deslocamentos horizontais e assentamentos com o modelo <i>2D</i> , nas fases do 1º e último níveis de escavação.	38
3.14	Desenvolvimento das forças nas escoras (E1, E2, E3, E4 e E5) durante as várias fases de escavação dos modelos <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	39
4.1	Geometria do modelo tridimensional com largura de 1 m (valores em metros).	42
4.2	Comparação entre as malhas de elementos finitos <i>3D</i> e <i>2D</i>	43
4.3	Deslocamentos horizontais e assentamentos para o modelo tridimensional com largura de 1 m, comparados com os resultados da modelação bidimensional, para <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	44
4.4	Geometria dos modelos tridimensionais para uma parede moldada com 5 m de largura (valores em metros).	45
4.5	Malha de elementos finitos para os cinco modelos propostos, no estudo da instalação de uma parede moldada de 5m de comprimento.	46
4.6	Resultados dos testes das malhas para o modelo <i>WIM</i> : deslocamentos horizontais no tardo da parede e deslocamentos verticais na superfície do terreno.	47
4.7	Resultados dos testes das malhas para o modelo <i>WIM</i> : deslocamentos verticais na superfície do maciço durante a fase de escavação do painel.	48
4.8	Identificação dos eixos de modelação.	49
4.9	Faces da vala tridimensional com 5 m de largura.	49
4.10	Fases construtivas da instalação de uma parede de 5 m de largura, modelada por dois eixos de simetria.	50
4.11	Desenvolvimento das tensões horizontais, σ_x , durante o processo construtivo da parede.	51
4.12	Desenvolvimento das tensões horizontais, σ_z , durante o processo construtivo da parede.	52
4.13	Desenvolvimento das tensões verticais, σ_y , durante o processo construtivo da parede.	52
4.14	Tensões horizontais σ_x e σ_z para as três fases de instalação da parede moldada.	53

4.15	Identificação de três eixos auxiliares, para a análise das tensões horizontais para o modelo 3D com um painel.	54
4.16	Vectores dos deslocamentos do solo durante a construção da parede.	55
4.17	Identificação dos planos de análise dos resultados para o modelo 3D com um painel.	56
4.18	Deslocamentos horizontais, dx , no tardo da parede e assentamentos do solo na superfície do maciço, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.	57
4.19	Deslocamentos horizontais, dx , direcção do eixo X , do solo durante a construção da parede, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.	58
4.20	Deslocamentos horizontais, dz , direcção do eixo Z , do solo durante a construção da parede, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.	59
4.21	Deslocamentos verticais, dy , na direcção do eixo Y , do solo durante a construção da parede.	59
4.22	Comparação dos deslocamentos horizontais e assentamentos entre o modelo 3D com 5 m de largura e o modelo 2D calculado no Capítulo 3, para as fases de instalação da parede.	60
4.23	Malha de elementos finitos para a modelação de uma parede moldada com 40 m de largura, constituída por 8 painéis.	61
4.24	Ordem de instalação dos painéis da parede moldada.	61
4.25	Desenvolvimento das tensões horizontais no maciço, σ_x , durante o processo construtivo da parede moldada.	62
4.26	Desenvolvimento das tensões horizontais no maciço, σ_z , durante o processo construtivo da parede moldada.	64
4.27	Desenvolvimento das tensões verticais no maciço, σ_y , durante o processo construtivo da parede moldada.	66
4.28	Desenvolvimento dos deslocamentos horizontais dx da vala frontal, durante o processo construtivo da parede moldada.	67
4.29	Deslocamentos máximos nas três direcções (X , Y e Z), para as várias fases de execução dos painéis.	68
4.30	Identificação dos planos de leitura para o modelo 3D com 8 painéis de 5 m.	68
4.31	Deslocamentos horizontais e verticais (dx e dy) em cada painel durante a escavação de um deles.	70
4.32	Desenvolvimento dos deslocamentos horizontais das valas laterais, durante o processo construtivo da parede moldada.	71

4.33	Identificação do plano de análise dos resultados da Figura 4.34 para o modelo 3D com 8 painéis.	72
4.34	Deslocamentos horizontais, dz , na parede lateral da vala e deslocamentos verticais na superfície do maciço (no mesmo plano), durante a escavação dos 8 painéis.	72
4.35	Desenvolvimento dos deslocamentos verticais, durante o processo construtivo da parede moldada.	73
5.1	Tensão efectiva horizontal, σ'_x , no maciço na fase inicial.	79
5.2	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 1.	80
5.3	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro e último painéis da parede, para o Solo 1.	82
5.4	Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0=0,5$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.	83
5.5	Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0=0,5$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.	84
5.6	Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0=2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.	86
5.7	Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0=2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.	87
5.8	Deslocamento horizontal do solo da face lateral da vala e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 1.	89
5.9	Desenvolvimento deslocamentos totais no Solo 1, no início (Fase 1, à esquerda, escavação e colocação da bentonite no 1º painel) e no final (Fase 23, à direita, betonagem do 8º painel) do processo construtivo da parede moldada, para os diferentes valores de K_0	91
5.10	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0=0,5$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	92
5.11	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0=1,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	93

5.12	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0 = 2,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	94
5.13	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 2.	96
5.14	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro e último painéis da parede, para o Solo 2.	97
5.15	Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 0,7$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.	98
5.16	Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.	99
5.17	Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 0,7$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.	99
5.18	Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.	100
5.19	Desenvolvimento deslocamentos totais no Solo 2, no início (Fase 1, à esquerda, escavação e colocação da bentonite no 1º painel) e no final (Fase 23, à direita, betonagem do 8º painel) do processo construtivo da parede moldada, para os diferentes valores de K_0	101
5.20	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0 = 1,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	102
5.21	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0 = 1,5$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	103
5.22	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0 = 2,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.	104
5.23	Quatro modelos de estudo da influência da largura do painel para a construção de uma parede moldada num maciço constituído pelo Solo 1.	106
5.24	Deslocamento horizontal (dx) do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 1.	108

5.25	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	109
5.26	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	110
5.27	Assentamento na superfície do maciço durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	111
5.28	Assentamento na superfície do maciço no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	111
5.29	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	112
5.30	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.	113
5.31	Quatro modelos de estudo da influência da largura do painel para a construção de uma parede moldada num maciço constituído pelo Solo 2.	114
5.32	Deslocamento horizontal (dx) do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 2.	116
5.33	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	117
5.34	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	117
5.35	Assentamento na superfície do maciço durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	118
5.36	Assentamento na superfície do maciço no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	119
5.37	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	120
5.38	Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.	120
5.39	Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro painel da parede, para o Solo 1.	122

5.40	Deslocamento horizontal do solo no tardo do da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 1.	123
5.41	Deslocamento horizontal do solo no tardo do da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro painel da parede, para o Solo 2.	124
5.42	Deslocamento horizontal do solo no tardo do da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 2.	125

Índice de Quadros

2.1	Resumo dos modelos estudados por outros autores.	9
2.2	Resumo dos modelos paramétricos.	14
2.3	Resumo dos modelos de escavações suportadas por paredes moldadas e escoradas estudados por outros autores.	17
3.1	Faseamento construtivo e faseamento adoptado na modelação da instalação da parede (<i>WIM</i>).	22
3.2	Propriedades dos materiais utilizados nos modelos.	24
3.3	Deslocamentos máximos da Fase 1 - Escavação e bentonite.	28
3.4	Deslocamentos máximos da Fase 2 - Betão fresco.	30
3.5	Deslocamentos horizontais máximos no tardo da parede (δh_{max}) e variação destes (Δ_H) durante o faseamento construtivo para as modelações <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	37
3.6	Assentamentos máximos na superfície do maciço (δv_{max}) e variação destes (Δ_V) durante o faseamento construtivo para as modelações <i>WIP</i> e <i>WIM</i>	37
4.1	Distância dos planos de análise da Figura 4.17 ao Plano 1.	58
5.1	Características dos solos utilizados no estudo paramétrico.	78
5.2	Cálculos efectuados na análise paramétrica.	78

Capítulo 1

Introdução

As paredes moldadas são uma técnica versátil que permite a realização de escavação em meio urbano, na proximidade de outras estruturas e de arruamentos, cuja instalação no terreno, prévia à execução da escavação geral pretendida, procura perturbar o mínimo possível o meio envolvente.

Definem-se como paredes moldadas os elementos estruturais, do tipo lajes verticais, fabricados em betão armado, construídos *in situ* por meio de escavação de valas profundas sem entivações.

Estas paredes, também designadas como cortinas, são construídas antes da execução da escavação geral, e têm como objectivo suportar o volume de terreno no seu tardo. Para que a vala se mantenha durante a escavação são utilizadas lamas bentoníticas, ou bentonite, como forma de garantir a estabilidade das paredes da vala. Estas são inseridas à medida que a escavação da vala avança e são extraídas à medida que se introduz o betão na vala. A localização exacta e a verticalidade da vala escavada são garantidas pelos muros-guia, construídos no início de todo este processo.

Durante a execução da escavação geral do terreno são aplicados vários níveis de escoras, com o intuito de controlar a sua deformação face aos movimentos do maciço.

A Figura 1.1 ilustra as várias fases de construção da parede moldada, em que:

1. construção dos muros guia em toda a extensão pretendida para a parede;
2. abertura da vala por remoção do solo, e preenchimento simultâneo com lamas bentoníticas;
3. introdução das armaduras da parede dentro da vala;
4. betonagem do painel e remoção da bentonite, em simultâneo.

Este trabalho aborda este problema através da análise bibliográfica e modelação numérica, com recurso ao programa *Plaxis 2D* e *Plaxis 3D*, que aplica o método dos elementos finitos ao problema.

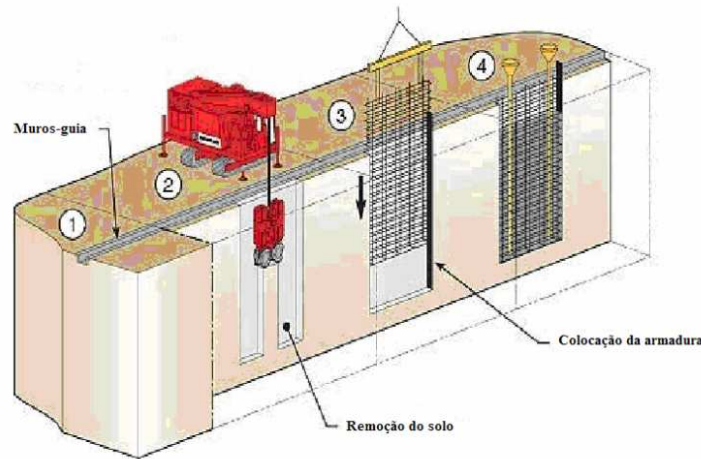


Figura 1.1: Fases de construção de uma parede moldada no terreno (Sousa et al., 2006).

O trabalho procura, em primeiro lugar mostrar, recorrendo ao método bidimensional, a importância do recurso à técnica *WIM* (Wall Installation Modelled) face à *WIP* (Wished In Place). Com efeito, na modelação do tipo *WIP* considera-se que a parede se encontra já instalada no terreno, previamente ao faseamento construtivo da execução da escavação pretendida, pelo que não se consideram os efeitos da instalação da parede. Pelo contrário, no modelo *WIM*, na fase inicial o maciço é considerado sem a parede, procedendo-se à modelação da sua instalação e à consideração dos efeitos dessa instalação nos deslocamentos e no estado de tensão no maciço.

O trabalho, em seguida, centra-se no modelo *WIM* e na importância dos aspectos tridimensionais da modelação da instalação de painéis de parede moldada, quer na execução de um painel isolado, quer numa sequência de painéis.

O presente trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- no Capítulo 2 aborda-se alguma da bibliografia existente e referente ao problema em estudo. Reconhecem-se e analisam-se alguns dos estudos já executados, incluindo métodos de modelação e respectivos resultados;
- no Capítulo 3 estuda-se e analisa-se o problema proposto no âmbito da modelação bidimensional. Os cálculos efectuados neste capítulo são a repetição da modelação efectuada por Faria e Guerra (2008) como modo de compreender o envolvimento do problema assim como o comportamento e a reacção do maciço face à instalação de uma parede moldada com largura infinita, assim como a execução da própria escavação e instalação dos vários níveis de escoramento;
- no Capítulo 4 é feito o reconhecimento da importância do estudo do problema utilizando um modelo tridimensional. Começa-se por reproduzir os modelos executados no capítulo anterior, partindo-se depois para uma abordagem tridimensional mais próxima da real, executada em obra. Estuda-se e analisa-se o comportamento do maciço

face à instalação da parede moldada tentando prever o que poderá acontecer em obra.

- com base no modelo analisado no Capítulo 4 estuda-se no Capítulo 5 a influência de alguns factores considerados importantes na modelação do problema tridimensional e bidimensional, tais como o estado de tensão inicial do maciço, a largura e a espessura do painel;
- por fim, apresentam-se no Capítulo 6 as principais conclusões dos estudos desenvolvidos.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Introdução

Na modelação de escavações suportadas por paredes moldadas pode, no que respeita à forma como o processo construtivo da parede é considerado, admitir-se duas abordagens distintas. Na primeira considera-se que a parede se encontra previamente instalada no maciço, o que significa que não se têm em conta os efeitos da sua construção e que, portanto, os deslocamentos e as alterações do estado de tensão do terreno efectivamente modelados são apenas os que provêm do restante faseamento construtivo. Esta abordagem é designada na bibliografia da literatura inglesa por *WIP - Wished In Place*, e será esta a designação adoptada no presente trabalho. Na segunda abordagem, a execução da parede é efectivamente modelada, pelo que os seus efeitos no maciço são considerados. Os deslocamentos do maciço e as alterações do seu estado de tensão provêm, portanto, quer da construção da parede quer do restante faseamento. Esta abordagem é designada por *WIM - Wall Installation Modelled*.

Assim, na abordagem *WIP*, admite-se que a parede já foi executada, antes do início do cálculo e, na abordagem *WIM*, há que modelar a sua construção. A forma de o fazer é descrita na secção 2.2.

A Figura 2.1 mostra como os dois modelos se distinguem: do lado esquerdo representam-se as fases relevantes para o modelo *WIP* e, no lado direito, para o modelo *WIM*. Em 2.1(a) está representado o estado do maciço na fase inicial para o modelo *WIP*, apresentando-se este indeformado e considerando a parede já existente. Admite-se, assim, que a execução da parede não teve qualquer efeito no maciço. Em 2.1(b) é ilustrado o estado de deformação do maciço do modelo *WIM* na fase final da instalação da parede (cura do betão).

Assim, o modelo *WIM* inicia os níveis de escavação já com o maciço deformado, devido à modelação da instalação da própria parede, o que não acontece em *WIP*. A meio do processo de escavação (e escoramento) os dois modelos apresentam níveis de deformação distintos, tanto em forma como em valor, como se observa em 2.1(c) e 2.1(d), respectivamente para os modelos *WIP* e *WIM*. As razões para as diferenças são os efeitos directos

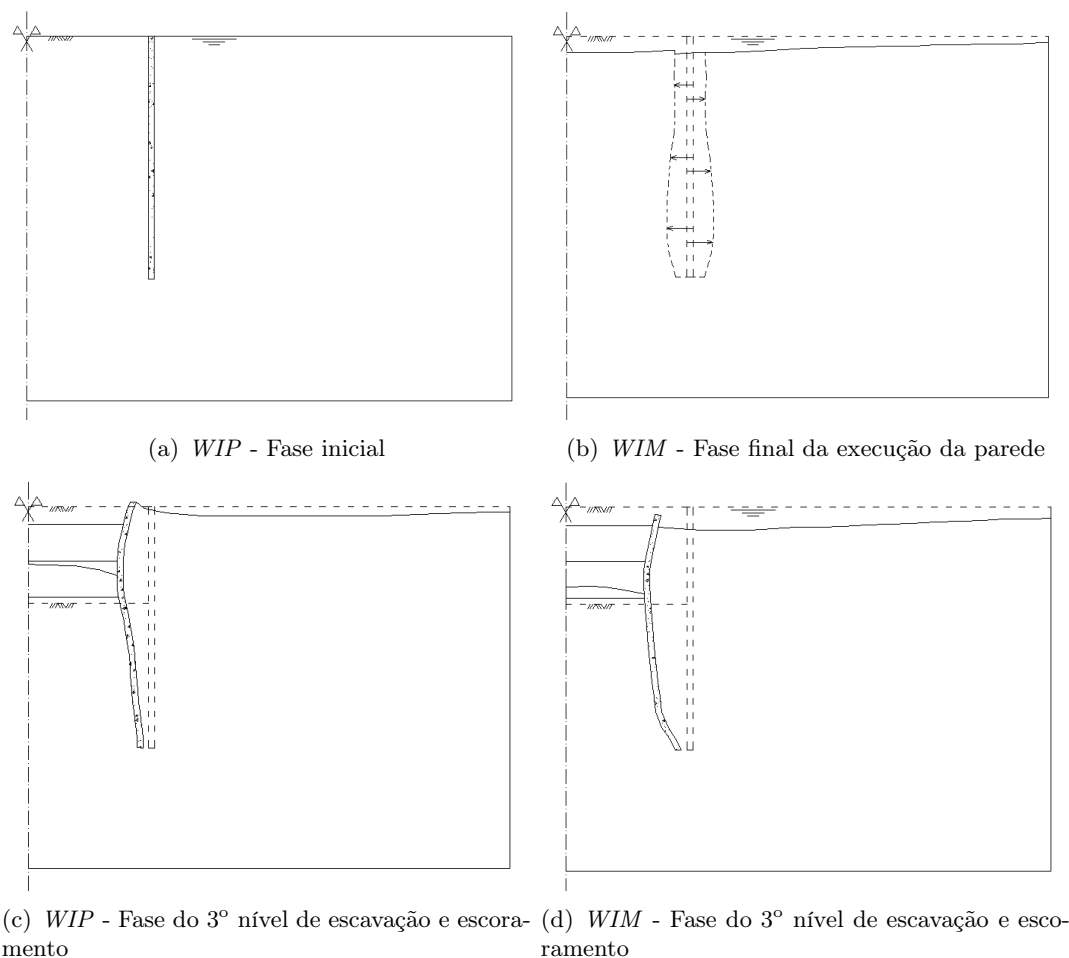


Figura 2.1: Deformação dos modelos *WIP* (à esquerda; figuras (a) e (c)) e *WIM* (à direita; figuras (b) e (d)) durante as fases inicial e intermédia da escavação.

da instalação da parede nos deslocamentos (que existem no *WIM* mas não no *WIP*) e a alteração do estado de tensão que a instalação causa, no caso do *WIM*, relativamente ao *WIP*. Este assunto será abordado em maior detalhe nas secções seguintes.

2.2 Modelação do procedimento construtivo da parede

Apresenta-se, em seguida, como o procedimento construtivo de uma parede moldada pode ser modelado, considerando, portanto, o caso *WIM*.

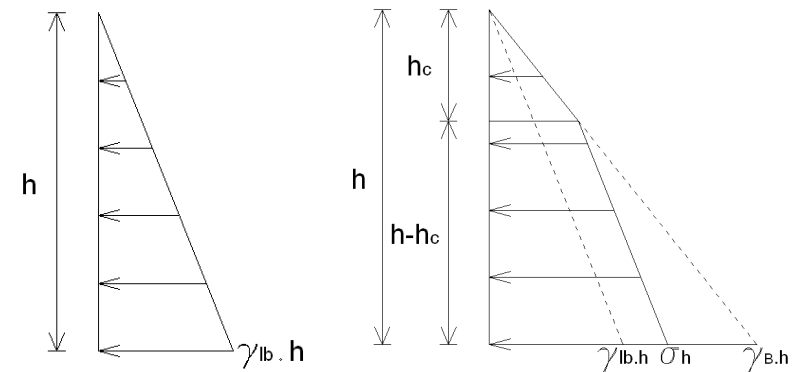
Na modelação da construção de uma parede moldada, consideram-se três fases: 1. escavação da vala onde será executada a parede, que é acompanhada pela sua estabilização através de lamias bentoníticas; 2. betonagem; e 3. endurecimento do betão.

2.2.1 Escavação da vala e colocação das lamas bentoníticas

A instalação da parede tem início com a abertura da vala e o preenchimento desta com lamas bentoníticas, de modo a permitir a estabilização das suas paredes. Para a fase de escavação da vala, despreza-se o efeito da acção do “grabber” e o seu efeito nas paredes da vala. Durante a escavação e preenchimento com as lamas bentoníticas verificam-se dois efeitos contraditórios: por um lado, o processo de escavação implica a libertação de tensões que, antes da escavação, eram equilibradas pelo solo no interior da vala; esta libertação fará com que o solo sofra deslocamentos para o interior da vala e, se não se verificasse o preenchimento com bentonite, a anulação das tensões nas superfícies escavadas; por outro lado, a introdução das lamas bentoníticas aplica tensões com efeitos contrários às tensões libertadas, produzindo também o efeito contrário, no que diz respeito a deslocamentos.

A lama bentonítica é um fluido, com peso volúmico um pouco superior ao da água. A sua modelação é feita através da aplicação de pressões hidrostáticas, dependentes do seu peso volúmico, γ_{lb} e da profundidade da vala, h . Assim, como esperado e também verificado em medições efectuadas em obra por Lings et al. (1994), o diagrama de pressões aplicadas pela bentonite corresponde ao que se apresenta na Figura 2.2(a), dado pela expressão:

$$\sigma_{lb} = \gamma_{lb} \cdot z \quad (2.1)$$



(a) Pressões exercidas pela bentonite na face da vala. (b) Pressões exercidas pelo betão líquido na face da vala, Ng (1992).

Figura 2.2: Diagramas de pressões aplicadas na fase de instalação da parede moldada.

2.2.2 Betonagem do painel

A armadura da parede é colocada na vala, com o auxílio de uma grua, quando aquela se encontra ainda preenchida com bentonite. Não se considera qualquer efeito no maciço devido à sua colocação. O betão é, depois, bombeado para o interior da vala, substituindo a lama bentonítica.

Segundo Ng (1992), durante a betonagem de um painel com bentonite desenvolve-se

um diagrama de pressões idêntico ao ilustrado na Figura 2.2(b). Esta Figura representa graficamente a seguinte expressão, também definida pelo mesmo autor:

$$\sigma_B = \begin{cases} \gamma_B \cdot z & , \text{ para } z \leq h_c \\ \gamma_B \cdot h_c + \gamma_{lb} \cdot (z - h_c) & , \text{ para } z > h_c \end{cases} \quad (2.2)$$

em que γ_B é o peso volúmico do betão, γ_{lb} é, como se viu, o peso volúmico da lama bentonítica, z é a profundidade do ponto onde se pretende determinar a pressão e h_c é a altura crítica, até à qual a tensão horizontal é igual à tensão hidrostática do betão.

A expressão (2.2) corresponde ao que foi anteriormente verificado por Clayton e Milititsky (1983). Com efeito, o seu estudo conclui que as pressões, medidas durante a betonagem de uma parede moldada, atingem valores próximos dos hidrostáticos nas zonas mais próximas da superfície do terreno, e menores que os hidrostáticos a níveis mais profundos.

Lings et al. (1994) verificam que o valor da altura crítica (h_c) é principalmente afectado pela temperatura de betonagem. Nas medições feitas *in situ* em várias obras verificou-se que, para valas de altura inferior a 20 m betonadas a temperaturas correntes, a altura crítica era da ordem de um terço da altura total da parede ($1/3h$).

2.2.3 Endurecimento do betão

O processo de endurecimento do betão passa pela colocação de material na vala, reprechendo-a, com as propriedades físicas do material em estado endurecido e em regime elástico. O estado de tensão não se altera.

2.2.4 Modelo simplificado

Como se viu em 2.1 a adopção *WIM* permite, relativamente ao modelo *WIP*, devido à instalação da parede considerar por um lado, os deslocamentos produzidos e, por outro, a alteração do estado de tensão. Powrie e Li (1991) adoptaram um procedimento simplificado em que atribuíam um coeficiente de impulso em repouso inferior ao inicial, por forma a ter em atenção os efeitos de execução da parede no que se refere ao estado de tensão inicial. Trata-se de um modelo simplificado que permite considerar, nomeadamente, os efeitos nos deslocamentos da própria construção da parede.

2.3 Modelação e instrumentação da execução de paredes moldadas

Apresenta-se no Quadro 2.1 um resumo das características dos casos encontrados na bibliografia relativamente à modelação e à medição dos efeitos da construção das paredes moldadas no terreno. Trata-se, em alguns dos trabalhos indicados, da aplicação de modelos

numéricos a casos de obra reais.

Quadro 2.1: Resumo dos modelos estudados por outros autores.

Autor	Estudo realizado	Obra instrumentada	N.º de painéis modelados	Dimensões do painel		
				$h(m)$	$e(m)$	$L(m)$
Farmer e Attewell (1973)	Experimental	London Clay	-	-	-	-
Powrie e Li (1991)	Numérico $2D$	-	1	18.0	1.5	∞
Gunn e Clayton (1992)	Numérico $2D$	-	1	20.0	1.0	∞
Ng et al. (1995)	Numérico $3D$ a simular $2D$ e Experimental	Lion Yard Cambridge	3	16.4	0.6	0.8
Poh e Wong (1998)	Experimental	Singapura	-	55.5	1.2	6.0
Ng e Yan (1999)	Numérico $3D$ e Experimental	Lion Yard Cambridge	3	8.0	0.6	6.0
Gourvenec e Powrie (1999)	Numérico $3D$ e Experimental	Bath	9	15.0	1.0	2.5; 3.75; 5.0; 7.5; ∞
Poh et al. (2001)	Experimental	Singapura	-	de 3,0 a 55.5	de 0.6 a 1.2	de 2.4 a 7.5
Schafer e Triantafyllidis (2004)	Numérico $3D$ e Experimental	Oslo	7	28.0	1.0	5.0
Schafer e Triantafyllidis (2006)	Numérico $3D$ e Experimental	Taipei	5	35.0	1.0	5.0

Os modelos experimentais executados nas obras indicadas recorreram a instrumentos de medição aplicados *in situ*, tais como inclinómetros, piezómetros, marcas de assentamento e extensómetros, entre outros.

No presente trabalho serão designadas as dimensões do modelo da seguinte forma:

- a - comprimento do modelo, medido na direcção do eixo X ;
- b - largura do modelo, medido na direcção do eixo Y ;
- c - altura do modelo, medido na direcção do eixo Z ;
- e - espessura da parede ou do seu painel constituinte;
- L - largura da parede ou do painel constituinte;
- h - altura da parede ou do painel constituinte.

Estas grandezas estão representadas na Figura 2.3.

2.3.1 Procedimentos de modelação

Apresenta-se na Figura 2.4 exemplos de malhas de elementos finitos 2D e 3D utilizadas por alguns autores. Os elementos finitos da malha tomam dimensões menores na proximidade da parede (maior refinamento de malha), alargando à medida que se afasta desta até à

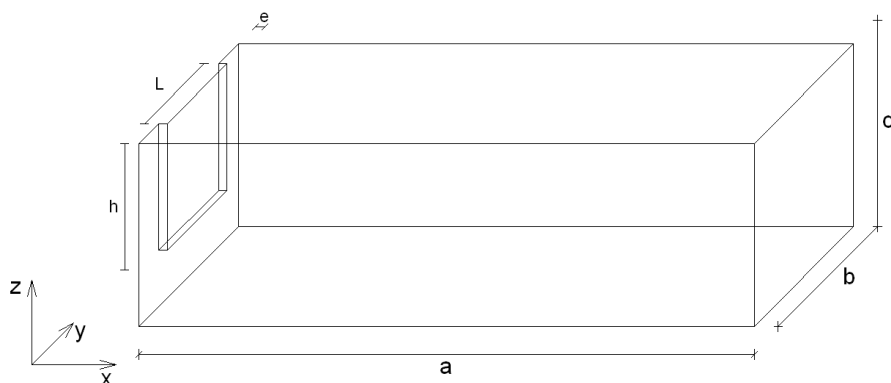


Figura 2.3: Designações das dimensões do modelo e da parede moldada.

extremidade do modelo, de modo a otimizar o cálculo do modelo, o que é particularmente importante na modelação tridimensional.

O faseamento construtivo passa pelas fases descritas em 2.2. Ng e Yan (1998) e Gourvenec e Powrie (1999) consideram que a colocação das lamas bentoníticas se poderá dividir em várias fases, alterando a altura de bentonite na vala, assim como a altura de betão, estando em algumas das fases a vala cheia com parte de betão e outra parte de bentonite.

No caso de Schafer e Triantafyllidis (2004), Ng e Yan (1999) e Ng et al. (1995) a construção dos painéis adjacentes é feita de modo intercalado. Gourvenec e Powrie (1999) modelaram a construção dos painéis de forma sequencial.

Quanto ao modo de modelar a colocação da bentonite e do betão fresco, todos os autores referidos no Quadro 2.1 aplicaram os diagramas propostos por Ng (1992) e Lings et al. (1994), baseados em Clayton e Milititsky (1983).

2.3.2 Processos de transferência de tensões e mecanismos de deformação durante a construção de paredes moldadas

Os resultados de várias análises (Ng e Yan, 1998) indicam que durante a escavação de um painel há um alívio do estado de tensão no tardo do painel escavado, provocando uma descompressão do solo. Este alívio de tensões dá-se por um processo que denominam de *mecanismo de transferência de carga*.

Na Figura 2.5 estão ilustradas e esquematizadas as trajectórias das tensões no processo de instalação da parede. Segundo conclusões de Ng et al. (1995) este fenómeno pode-se desenvolver em duas direcções, horizontal e vertical, dando origem a dois processos de transferência de carga distintos.

No seu estudo, Ng et al. (1995) realizaram dois modelos bidimensionais (um com o plano horizontal e outro com o plano vertical) para o mesmo problema, de modo a aproximar-se a um estudo tridimensional, para análise dos dois processos de transferência de carga em separado, ponderando a influência de cada um. Os autores concluem que existe um

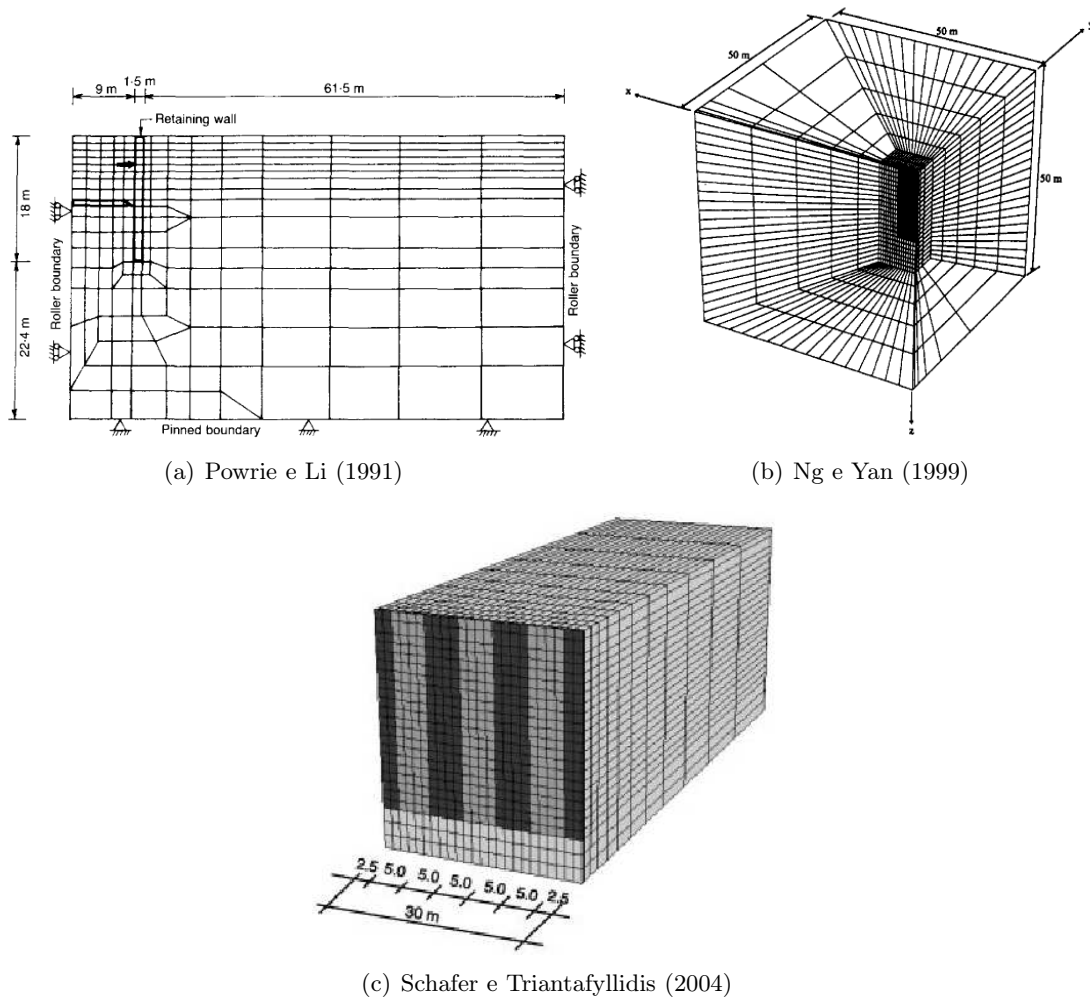


Figura 2.4: Exemplos de malhas de elementos finitos utilizadas pelos autores referidos no Quadro 2.1.

mecanismo de transferência de carga na direcção horizontal, caracterizado por um *efeito de arco horizontal*. Durante a escavação há uma redução significativa das tensões na zona escavada e um aumento das mesmas no solo lateralmente adjacente, assim como nos painéis laterais que já tenham sido instalados.

Embora a carga se distribua lateralmente em maior proporção, observa-se outro fenómeno nestes modelos. Na direcção vertical a carga distribui-se para a zona inferior ao fundo da vala. Sendo que neste caso, apenas se poderão direccionar para baixo, o efeito de arco não é aplicado, pois um arco suportado apenas de um lado colapsaria. Sendo assim, o fenómeno identifica-se como *mecanismo de transferência de carga vertical*.

Na Figura 2.5 é visível a incidência dos dois fenómenos em cada zona do painel betonado. O ponto A situa-se no tardo da zona superior do painel, aí o solo tende a distribuir as suas tensões horizontalmente, aumentando as tensões do solo lateralmente. No entanto, o solo situado na zona do ponto B transfere a maior parte da sua carga na direcção vertical, para o solo situado abaixo do fundo da vala, distribuindo muito menos na direcção

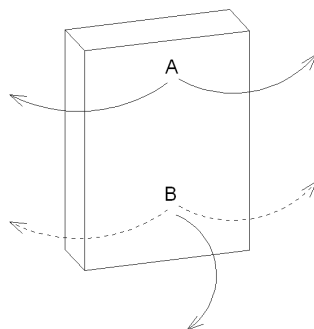


Figura 2.5: Processo de transferência de carga, horizontal e vertical, para um painel (Ng et al., 1995).

horizontal. Este efeito é verificado devido à proximidade do ponto B com a base da vala escavada.

Estes mecanismos são possíveis de se observar conjuntamente nas análises numéricas tridimensionais. No caso de modelos bidimensionais, em deformação plana, em que a parede terá um comprimento muito grande, o efeito de arco horizontal torna-se impossível de observar.

Comparando os resultados analíticos com as medições de campo, Ng e Yan (1998) determinaram que os fenómenos de transferência de carga e consequente aumento de tensões se verificam até distâncias dependentes das dimensões do painel escavado. O volume influenciado pela redistribuição de tensões é representado na Figura 2.6. Segundo os autores o efeito de arco horizontal é influente nas tensões do solo adjacente até uma distância de $1/3$ da largura do painel, enquanto que o mecanismo de transferência de carga vertical abrange $1/3$ da altura do painel. Na direcção perpendicular ao plano do painel o solo alterado pode ir até a uma medida igual à sua altura.

Deste modo também se pode concluir que, quando os painéis são instalados de forma sequencial, a instalação do último painel irá interferir pouco no comportamento do primeiro painel instalado, visto este se encontrar algo distante do volume de influência.

Após a betonagem do painel a tensão volta a ser parcialmente redistribuída para o solo no tardo da parede betonada. Dá-se um aumento de tensões horizontais, e dependendo do tipo de solo e das suas tensões iniciais, o estado de tensão poderá recuperar até ao seu estado inicial, invertendo assim os mecanismos de transferência de carga.

2.3.3 Deformação do maciço durante a construção da parede

Segundo Ng et al. (1995) a deformação do solo depende directamente de vários factores:

- altura e comprimento do painel;
- estado de tensão inicial do maciço;

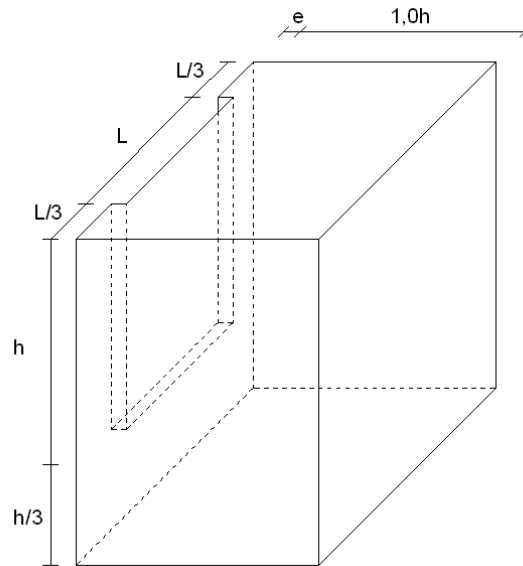


Figura 2.6: Volume de influência dos mecanismos de transferência de carga na proximidade do painel (Ng e Yan, 1998).

- rigidez do solo;
- diferença entre as pressões da bentonite, do betão fresco e tensão inicial do solo.

Directamente ligados a este estão os efeitos provocados pelos mecanismos de transferência de carga analisados em 2.3.2. Tanto a deformação vertical como a horizontal estão directamente relacionadas com o alívio de tensões provocado pela escavação da parede.

Deslocamentos horizontais no tardo da parede

Os deslocamentos horizontais no tardo da parede são linearmente dependentes da altura do painel construído. Segundo Ng et al. (2004), o maior deslocamento regista-se no solo situado no tardo da parede, a meio da sua largura, quando a vala é escavada e preenchida com bentonite. Este deslocamento pode atingir valores superiores a 5 vezes o registado no bordo do painel.

Na fase da betonagem verifica-se que o solo poderá recuperar significativamente a deformada devido à primeira fase, dependendo das características do solo. O efeito de arco horizontal está intimamente ligado a este comportamento. Na fase da colocação da bentonite, quando se dá o alívio de tensões, o solo descomprime deslocando-se na direcção da vala escavada. Na betonagem, parte das tensões é redistribuída de novo para aquela zona aumentando as suas tensões e a sua compressão, pelo que o deslocamento horizontal se dá no sentido contrário da vala, recuperando parte da deformada.

Assentamentos na superfície do terreno

Os assentamentos na superfície do terreno são originados pela descompressão do solo em profundidade. Estes tomam valores significativos até uma distância perpendicular ao plano da parede de $1,5h$, sendo h a altura da parede (Ng e Yan, 1999). O máximo assentamento é localizado a uma distância de 20% da altura do painel, durante a fase de escavação da parede e na proximidade do centro do painel.

Ng e Yan (1999) afirmam também que, considerando uma construção sequencial de três painéis, o assentamento à superfície é maior quando são executados o 2º e o 3º painéis, sendo o seu valor o dobro do assentamento registado na construção do 1º painel. Devido ao efeito de arco horizontal estes serão maiores no solo situado na zona central do painel do que no bordo deste (Ng et al., 2004).

2.3.4 Estudos paramétricos do problema

O Quadro 2.2 refere os dois principais trabalhos encontrados na bibliografia que tiveram em consideração o estudo paramétrico de vários factores que possivelmente influenciam o comportamento do solo quando se executa uma parede moldada.

Quadro 2.2: Resumo dos modelos paramétricos.

Autor	Factores em estudo		
	$L(m)$	$h(m)$	K_0
Ng e Yan (1998)	$1/3h$; $2/3h$; $1h$; $4/3h$; $5/3h$ e ∞	1,0 e 10,0	1,0; 1,5 e 2,0
Gourvenec e Powrie (1999)	2,5; 3,75; 5,0; 7,5 e ∞	15,0	2,46

Influência da largura do painel (L)

Segundo o estudo feito por Ng e Yan (1998), a diferença entre os deslocamentos calculados na análise 2D ($L = \infty$), comparados com a análise 3D, é considerável. A uma distância de $2L$ medida na perpendicular ao painel, os assentamentos da análise 2D são ainda muito significativos, ao contrário do que acontece no modelo tridimensional. Isto deve-se ao facto de, na análise 2D, não se considerar o mecanismo de efeito de arco horizontal que poderia reduzir os movimentos do solo por redistribuição lateral das tensões.

Em geral, pode-se afirmar que, quanto maior for o comprimento do painel (L), maiores serão os deslocamentos verticais e assentamentos, provocados pela sua instalação. A maior deformação corresponde ao caso da análise 2D, em estado plano de deformação, em que se considera a instalação de um painel de comprimento infinito.

Para Gourvenec e Powrie (1999) o deslocamento horizontal máximo dá-se na linha central do painel instalado, independentemente do seu comprimento, pois nos seus bordos os deslocamentos são bastante menores.

A relação percentual entre os deslocamentos máximos na análise 3D e na análise 2D, aumenta linearmente com o aumento da largura do painel. Esse aumento é mais pronunciado para as análises em que a relação h/L são inferiores ou iguais a 3.

Isto sugere que, na prática, deve-se ter em conta a relação h/L quando se pretende instalar uma parede moldada. Sendo que, quando $h/L \geq 3$ os deslocamentos são menores. Powrie e Kantartzi (1996) anteriormente aconselha que $h/L \geq 2$, a partir da análise de assentamentos obtidos em ensaios de centrífugadora.

A modelação bidimensional resulta numa previsão exagerada dos movimentos do solo, comparando com as várias análises tridimensionais, para vários comprimentos de painel.

Ng e Yan (1998) chegam mesmo a sugerir uma normalização dos resultados 2D, de modo a ser possível considerar nessa análise 2D os efeitos tridimensionais do problema. A normalização dos movimentos do solo é feita dividindo a distância do solo à vala pela altura do painel (x/h).

Influência das tensões iniciais (K_0)

Para Ng e Yan (1998) a variação dos assentamentos e deslocamentos horizontais máximos no solo é linearmente crescente com o aumento das tensões iniciais (K_0), independentemente do comprimento do painel.

Então, quanto maiores as tensões iniciais instaladas no solo (K_0), maiores serão as variações de tensão ao longo da instalação da parede, assim como maiores serão os movimentos do maciço.

2.4 Modelação de contenções flexíveis escoradas

2.4.1 Procedimentos de modelação

Considere-se agora o esquema ilustrado na Figura 2.7, em que se representa uma escavação simétrica suportada por uma parede moldada escorada em vários níveis e as diversas fases relevantes para a sua modelação.

A modelação deste problema passa pela instalação da parede, no caso do modelo *WIM*, ou da consideração da mesma já no local, para o caso do modelo *WIP*. Concluída esta primeira fase, já descrita nas secções anteriores, procede-se à modelação da escavação geral e do escoramento da parede, apresentadas nesta secção.

A remoção do solo é feita em vários níveis, em que cada fase de escavação é seguida da colocação de escoras um pouco acima do nível escavado. As escoras são elementos estruturais que podem ser pré-dimensionados recorrendo a diagramas aparentes como os de Terzaghi e Peck.

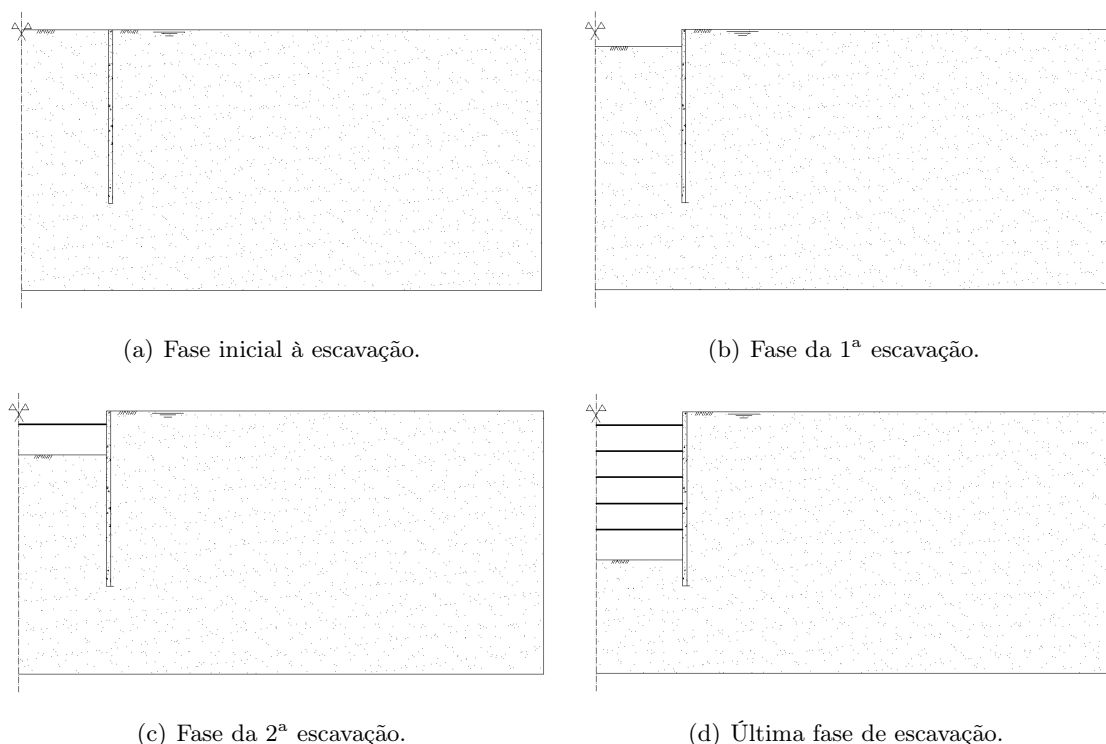


Figura 2.7: Esquema com parte da sequência de escavação do maciço suportado por uma parede moldada e escorada.

Para escavações simétricas e com faseamento simétrico a modelação pode tirar partido da existência do eixo de simetria. A cada nível de escavação considerado corresponde habitualmente um nível de escoramento, à excepção do último nível escavado. Assim, em todos os estudos consultados, indicados no Quadro 2.3, o número de níveis de escoramento é igual ao número de níveis de escavação subtraindo uma unidade.

Os modelos bidimensionais são modelados por simetria segundo um eixo vertical (Powrie e Li (1991), Ng e Lings (1995) e Gunn e Clayton (1992)). Quanto aos modelos tridimensionais, os autores Ou et al. (1996) modelam o canto de escavação suportada por uma parede escorada, representando um quarto do problema real, com dois planos de simetria. Schafer e Triantafyllidis (2006) modelam tridimensionalmente uma *fatia* de uma escavação por forma a estudar o efeito de execução e painéis alternados de parede moldada e a execução de uma escavação com contenção escorada.

A fronteira inferior dos modelos é considerada com deslocamento horizontal e vertical impedido-se as fronteiras laterais são admitidas com impedimento, apenas, dos deslocamentos horizontais.

A parede de suporte é considerada por estes autores (do Quadro 2.3) como sendo uma estrutura constituída por elementos finitos com as propriedades do betão armado. No entanto, este tipo de estrutura poderia ser modelado de outras formas. No caso de uma modelação $2D$ pode ser modelado também como um elemento do tipo viga, sendo definido por uma linha sem espessura aparente, constituída por elementos finitos $1D$, com determi-

Quadro 2.3: Resumo dos modelos de escavações suportadas por paredes moldadas e escoradas estudados por outros autores.

Autor	Modelo analisado	Tipo de modelo	Local da obra instrumentada	N.º de painéis	Dimensões da parede			Largura da escavação	N.º de níveis de escavação
					$h(m)$	$e(m)$	$L(m)$		
Powrie e Li (1991)	Numérico 2D	WIP	-	1	18,0	1,5 e 1,25	∞	9,0	2
Gunn e Clayton (1992)	Númerico 2D e Experimental	WIM	Londres	1	20,0	-	∞	-	1
Ng e Lings (1995)	Numérico 2D e Experimental	WIM	Lion Yard Cambridge	1	16,4	0,6	∞	5,4	4
Ou et al. (1996)	Numérico 3D, 2D e Experimental	WIP	Taipei	2	45,0	0,7	15,0	15,0	6
Schafer e Triantafyllidis (2006)	Numérico 3D e Experimental	WIP e WIM	Taipei	5	35,0	1,0	5,0	20,0	6

nada rigidez de flexão. No caso de modelação 3D a parede pode ser simulada com elementos análogos ao solo (3D), como foi adoptado pelos autores referidos no Quadro 2.3, ou então, pode ser modelada como uma estrutura do tipo *plate*, sem espessura aparente, constituída por elementos 2D. Para a modelação WIM o processo adequado será, naturalmente, o de modelar a parede com elementos do tipo do solo, dado que apenas com estes é possível considerar explicitamente a espessura do painel.

As estruturas de escoramento por sua vez são, em todos os artigos consultados na bibliografia, modelados por elementos barra com determinada rigidez axial. Powrie e Li (1991), Schafer e Triantafyllidis (2006) e Ou et al. (1996) utilizam dois tipos de estruturas de apoio: o primeiro é do tipo temporário, escoras a remover durante o processo de escavação, um segundo tipo com efeito permanente, uma laje de betão armado.

Nos casos bidimensionais, as escoras são simuladas no modelo como estruturas planas e contínuas, com as propriedades da escora de aço divididas pelo espaçamento, rigidez axial por metro de extensão (EA/m). No entanto, nos casos tridimensionais, este tipo de estrutura é modelado de outro modo, considerando para cada escora um elemento linear, com rigidez EA , aplicado num ponto específico da parede a escorar. Em ambos os estudos estes elementos admitem normalmente apenas esforço axial.

As lajes, estruturas de carácter permanente, colocadas no final da escavação, têm atribuídas as propriedades do betão armado e são modeladas com elementos finitos com determinada rigidez à flexão.

Na modelação do problema podem ser aplicados um outro tipo de elemento, a interface entre a parede e o solo. Este elemento permite que ao longo do processo de escavação seja possível o deslocamento relativo entre a parede e o solo. Os autores Powrie e Li (1991) e Ou et al. (1996) tomam em consideração este elemento para a modelação de uma escavação suportada por escoras durante o processo de escavação. Powrie e Li (1991) admitem estes

elementos no seu estudo atribuindo-lhes as propriedades da parede (betão) mas com uma rigidez reduzida e uma espessura fictícia de 0,1 mm.

O processo de escavação faz-se pela anulação dos elementos correspondentes à zona escavada e a consequente aplicação, nas fronteiras da zona escavada, das tensões instaladas inicialmente com sentido contrário. O escoramento segue-se a esta fase com a aplicação de um elemento com rigidez e comprimento determinados, que irá controlar a deformação da parede e absorver as tensões libertadas por esta aumentando deste modo a força da escora à medida que se avança a própria escavação. Quando se escava cada nível há um incremento de carga nas escoras, o que se pode verificar nos resultados das modelações numéricas assim como nas medições efectuadas em obras instrumentadas, nos casos dos autores referido no Quadro 2.3.

2.4.2 Análise dos casos estudados

Os resultados da modelação de Ng e Lings (1995) comparados com os medidos na obra instrumentada em Lion Yard verificam que, em ambas as modelações, *WIP* e *WIM*, as deformações previstas são maiores do que as medidas em obra. No entanto, no modelo *WIM* são obtidos valores de deslocamentos mais próximos dos medidos, do que os obtidos no modelo *WIP*. Considera-se então que, a modelação da instalação da parede é importante para a previsão dos deslocamentos do solo, durante a execução de uma escavação suportada por uma contenção escorada, o mesmo é verificado por Gunn e Clayton (1992).

Schafer e Triantafyllidis (2006) a quando a execução e medição da obra em Taipei simulam esse mesmo problema por um modelo de uma parede como *WIP* e outro como *WIM*, à semelhança de Ng e Lings (1995).

Os autores concluem que a consideração do processo de construção da parede leva a um aumento da previsão dos deslocamentos, na ordem dos 5 – 10%, na fase final da escavação principal. O modelo *WIM* consegue reproduzir identicamente o comportamento do solo no tardo da parede medido através de um inclinómetro colocado *in situ*. Quanto aos assentamentos, verifica-se que ambas as modelações subestimam a deformação à superfície do terreno, pois as medições indicam valores superiores de assentamentos. Contudo, a consideração da instalação da parede no modelo aumenta em cerca de 15% o assentamento máximo registado no modelo *WIP*.

Analizando o desenvolvimento das forças das escoras observa-se que estas aumentam com a profundidade da escavação geral. No entanto, o impacto da construção nas forças das escoras diminui para as escoras que se encontram a níveis de escavação inferiores. Os seus valores são, para o modelo *WIM*, 50% maiores em comparação com os valores calculados em *WIP*.

Analizando todos os casos aqui abordados pode-se concluir que o estado de tensão inicial dos maciços a suportar é um factor condicionante no desenvolvimento dos deslocamentos do solo ao longo da escavação, assim como no nível de compressão das escoras. No

caso das modelações com baixos coeficientes de impulso em repouso (K_0), os modelos *WIM* apresentam escoras com maiores forças de compressão que nos modelos *WIP*. O contrário se verifica para maciços escavados com valores de K_0 elevados, como é o caso das Argilas de Londres estudadas por Gunn e Clayton (1992) e Ng e Lings (1995).

2.5 Conclusões

Tradicionalmente não são modelados os efeitos da execução das paredes moldadas. A parede moldada é considerada já instalada no terreno (*WIP*). A modelação da sua instalação (*WIM*) permite considerar os efeitos nos deslocamentos e na alteração do estado de tensão do maciço.

A modelação da execução da parede faz-se considerando em simultâneo a escavação da vala e o seu preenchimento com bentonite (1ª fase) e o posterior preenchimento com betão (2ª fase). As pressões correspondentes à bentonite são hidrostáticas e, para a definição das pressões do betão, recorre-se a um diagrama de pressões bi-linear.

Os trabalhos consultados referentes à modelação e (ou) instrumentação da execução de paredes moldadas no terreno, permitem verificar que:

- A construção de um painel de parede moldada induz no terreno uma alteração do estado de tensão que se traduz por dois tipos de transferência de carga: uma na direcção horizontal e outra na direcção vertical.
- Os deslocamentos são em função da altura e largura do painel, do estado de tensão inicial do maciço, da rigidez do solo e da diferença entre as pressões da bentonite, do betão e da tensão inicial do solo.
- Os deslocamentos horizontais no tardo da parede são maiores a meio da largura do painel, no entanto, em altura, podem variar a sua posição, dependendo do solo considerado. Estes deslocamentos máximos dão-se quando a escavação é realizada e a vala é preenchida com bentonite. Na fase de betonagem há recuperação dos deslocamentos, que pode ser significativa.
- Os assentamentos da superfície do terreno suportado são significativos até à distância perpendicular à parede de $1,5h$. O máximo assentamento é localizado a $0,2h$.

Capítulo 3

Efeitos bidimensionais da execução de paredes moldadas no terreno

3.1 Introdução

Estuda-se, neste Capítulo, os efeitos da execução de paredes moldadas no terreno, através de modelação numérica bidimensional, por elementos finitos. Tal aproximação implica, portanto, que a parede moldada seja de comprimento infinito, hipótese impraticável mas essencial para o início do estudo, em termos simples.

O programa de modelação numérica utilizado foi o *Plaxis 2D*. Os cálculos efectuados neste capítulo são reprodução de um estudo anteriormente feito por Faria e Guerra (2008). Tal reprodução visa, por um lado, familiarizar a autora com os procedimentos de modelação da execução de paredes moldadas no terreno e, por outro, confirmar se os procedimentos usados nos cálculos numéricos do presente trabalho têm o efeito desejado. Adicionalmente, os cálculos permitirão compreender os efeitos bidimensionais da execução de paredes moldadas no terreno.

A comparação entre os dois modelos usados para reproduzir uma escavação suportada por contenções flexíveis é também um dos objectivos. Um dos modelos conta com a consideração da parede moldada já instalada no maciço a escavar - *Wished In Place (WIP)*. O modelo a que se compara, tem em consideração a construção da própria parede moldada contra o solo - *Wall Installation Modelled (WIM)*.

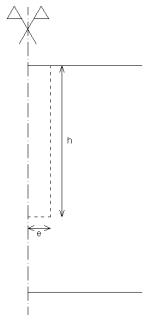
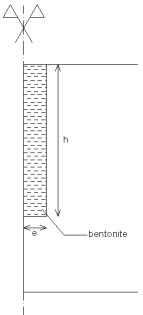
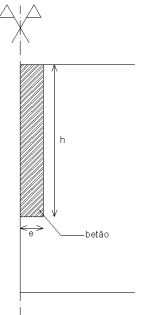
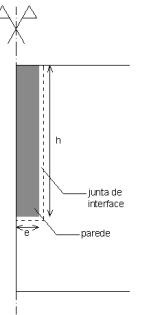
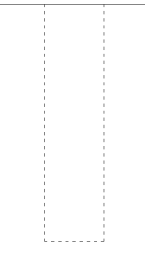
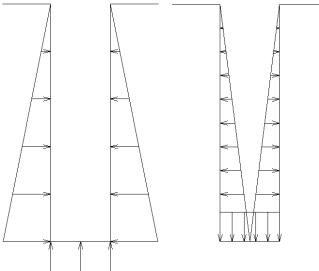
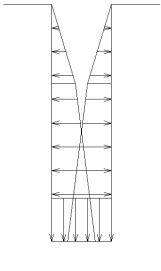

Este capítulo constitui também uma introdução e preparação para o estudo a efectuar no Capítulo 4 em que é feita a abordagem tridimensional do problema, assim como a sua análise.

3.2 Descrição detalhada dos modelos *WIP* e *WIM*

Assume-se no presente trabalho que a execução de uma parede moldada pode ser feita por dois modelos distintos. No primeiro modelo admite-se que a parede se encontra previamente instalada no terreno (*WIP*). No segundo modelo considera-se a instalação da parede como parte do próprio processo construtivo (*WIM*).

O modelo *WIP* admite que a instalação da parede moldada não tem significado para o processo construtivo, não afectando o estado de tensão no maciço nem os seus deslocamentos. O início do faseamento construtivo considera já a parede construída no terreno, pelo que a fase inicial desta modelação está representada na última coluna do Quadro 3.1.

Quadro 3.1: Faseamento construtivo e faseamento adoptado na modelação da instalação da parede (*WIM*).

Fase	Fase Inicial	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Construção				
Modelação				

O segundo modelo, *WIM*, pelo contrário, considera que as fases constituintes da instalação da parede poderão ter significado no conjunto dos resultados obtidos da construção. O Quadro 3.1 ilustra as várias fases de execução da parede moldada assim como o modo como essas fases são modeladas. Na situação inicial não há ainda parede e a zona em que será construída é, nesta fase, solo. A fase de escavação da vala, em termos de modelação, passa pelo processo de anulação da rigidez do solo, retirando os seus elementos da zona da vala. As tensões iniciais que estavam instaladas no maciço são aplicadas com sinal contrário na zona de fronteira do solo com a vala escavada e são colocadas as pressões correspondentes à bentonite no interior desta (Fase 1). Segue-se então a fase da betonagem (Fase 2) em que as pressões correspondentes ao betão em estado fresco são aplicadas no interior da vala, por substituição das pressões da bentonite, e segundo a equação (2.2) enunciada na secção 2.2.2. Na fase final da instalação (Fase 3), o betão ganha presa e endurece. Esta última fase

corresponde à fase inicial do modelo *WIP*.

Portanto, e em resumo, a simulação da instalação da parede no modelo numérico executa-se pela seguinte ordem:

- Fase 1 - Retiram-se os elementos de solo correspondentes à geometria da parede. Aplicam-se as pressões correspondentes à colocação da bentonite;
- Fase 2 - Substituem-se as pressões que simulam a bentonite por outras que simulam a colocação do betão fresco;
- Fase 3 - Retiram-se as pressões correspondentes ao betão fresco, reactivam-se os elementos da vala e substituem-se por um material de características idênticas às do betão curado.

3.3 Exemplo de aplicação do modelo *WIM*

Considere-se a simulação da instalação de uma parede moldada no terreno. O procedimento de instalação da parede descrito na secção 3.2 é aplicado a este caso.

3.3.1 Geometria do problema

A geometria da parede está esquematicamente representada na Figura 3.1. A parede tem uma altura de 20 m, admitindo-se que a 10 m do pé existe um estrato rígido, que coincide com a fronteira da malha de elementos finitos. A espessura da parede é de 0,8 m. Na modelação da instalação da parede, a sua espessura é representada por metade do seu valor real por simetria. Considerou-se o maciço com uma extensão 90 m de comprimento, como ilustra a Figura 3.1, ou seja, com um comprimento de $4,5h$, sendo h a altura da parede.



Figura 3.1: Geometria do modelo da parede moldada (unidades em metros).

3.3.2 Características dos materiais e condições iniciais

As características materiais a utilizar nos modelos estudados neste capítulo são definidas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2: Propriedades dos materiais utilizados nos modelos.

Material	Modelo	γ (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	δ ($^\circ$)	E_{ref} (kPa)	E_{inc} (kPa/m)	c_{ref} (kPa)	c_{inc} (kPa/m)	ν
Argila (Ng e Lings, 1995)	Mohr-Coulomb	20	0	0	$6,0 \times 10^4$	10 000	60	10	0,495
Betão	Elástico-linear	25	0	0	$2,6 \times 10^7$	-	-	-	0,2
Bentonite	-	12	-	-	-	-	-	-	-

O solo utilizado, argiloso, idêntico ao utilizado por Ng e Lings (1995), caracteriza-se por ter resistência não drenada crescente em profundidade, regida pela equação:

$$c_u = c_{ref} + c_{inc}z = 60 + 10z \quad [kPa] \quad (3.1)$$

em que c_u é resistência não drenada do solo em qualquer parte do maciço à profundidade z , em kPa . c_{ref} é a resistência não drenada de referência à profundidade nula e c_{inc} o seu incremento por metro de profundidade. A profundidade z é expressa em metros.

O modelo deste solo admite-se elástico-perfeitamente plástico com o módulo de deformabilidade $E_u = 1000c_u$, considerado no programa através de E_{ref} e E_{inc} , como o módulo de deformabilidade de referência (à profundidade nula) e o acréscimo por metro de profundidade, respectivamente.

A malha de elementos finitos utilizada está representada na Figura 3.2.

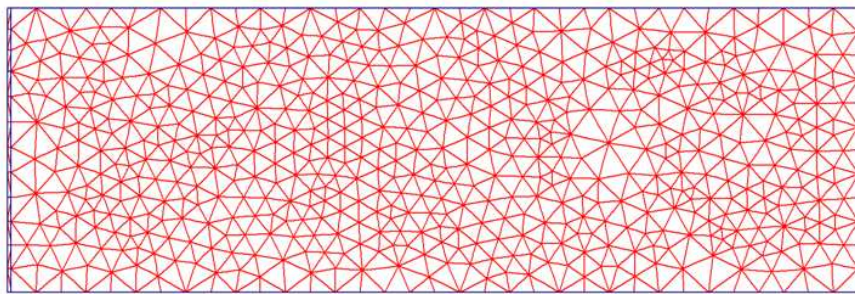


Figura 3.2: Malha de elementos finitos do problema bidimensional, modelado com o *Plaxis 2D*.

O cálculo foi realizado em tensões totais. A acção seguinte da modelação é gerar as tensões iniciais do maciço. O coeficiente de impulso em repouso dos materiais admitido nas modelações é definido em tensões totais. A equação seguinte define como foi determinado o coeficiente de impulso em repouso correspondente à análise em tensões totais (K_0^{TT}), dependendo do K_0 do solo e admitindo que o nível freático está à superfície do terreno.

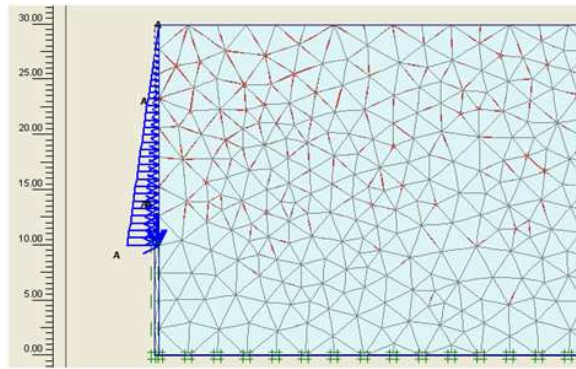
$$K_0^{TT} = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{K_0\gamma' + \gamma_w}{\gamma} \quad (3.2)$$

em que, para o caso a estudar neste capítulo, $K_0 = 1,5$ que corresponde a $K_0^{TT} = 1,25$.

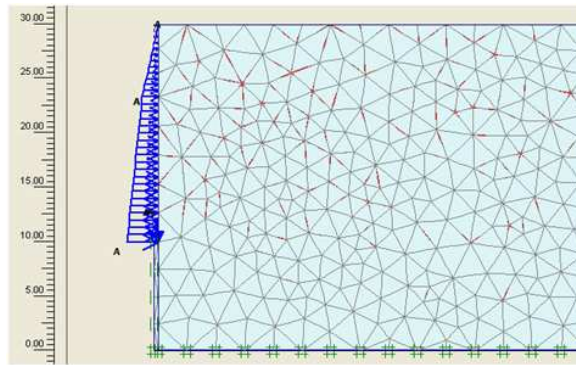
As tensões iniciais no maciço, determinadas usando o valor do peso volúmico do solo e deste coeficiente de impulso.

3.3.3 Descrição e faseamento construtivo

A bentonite tem peso volúmico, $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$, pelo que, a partir da equação 2.1, o diagrama é triangular, aplicado em toda a altura da vala escavada ($h = 20 \text{ m}$) e corresponde a uma tensão máxima no fundo da vala de 240 kN/m^2 . O betão fresco é aplicado segundo a equação (2.2), bi-linear, gerando uma tensão máxima no fundo da vala de $367,7 \text{ kN/m}^2$. A Figura 3.3 ilustra a situações em que a bentonite e o betão fresco são representados por aplicação destas pressões.



(a) Pressões devido à bentonite - Fase 1



(b) Pressões devido ao betão fresco - Fase 2

Figura 3.3: Pressões aplicadas na vala.

3.3.4 Resultados obtidos e análise comparativa

Na Fase 1, enquanto a vala é escavada e as lamas bentoníticas são introduzidas em simultâneo, verifica-se, pela Figura 3.4, que o terreno sofre um deslocamento horizontal

considerável ao longo de toda a altura da parede, diminuindo na proximidade do seu pé e anulando-se um pouco abaixo deste. A bentonite garante a estabilidade da vala. Sendo, neste caso, as tensões iniciais no maciço superiores às provocadas pela bentonite, os deslocamentos que decorrem desta fase são no sentido da vala escavada. Também Ng et al. (2004) verificam num trabalho anterior que o deslocamento horizontal máximo se dá na fase da colocação da bentonite, assim como o assentamento máximo na superfície do terreno.

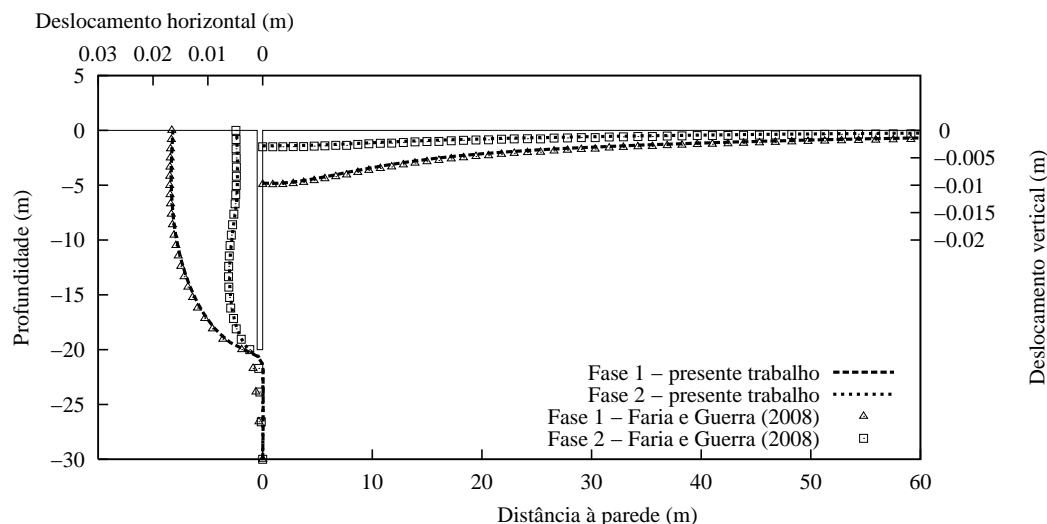


Figura 3.4: Comparação dos deslocamentos e assentamentos entre as duas modelações, nas Fases 1 e 2 da instalação da parede.

Um dos fenómenos a destacar nesta fase construtiva é o processo de transferência de carga. Este efeito dá-se quando a vala é escavada e, portanto, se verifica o correspondente alívio de tensões. As tensões instaladas naquela zona são automaticamente transferidas para o solo adjacente.

O processo de transferência de carga na direcção vertical dá-se quando a tensão aliviada é distribuída para a zona inferior ao pé da parede. Segundo Ng et al. (1995) este processo de transferência de carga na direcção vertical tem maior contribuição para o efeito de redistribuição de tensões, ou seja, a tensão é mais facilmente distribuída para a zona inferior do que para os lados do painel escavado. Este fenómeno é observado também na direcção horizontal, na análise dos modelos tridimensionais (Capítulo 4), pois os painéis terão larguras finitas e são construídos sequencialmente.

Sendo o modelo bidimensional, constituído por um painel único de largura infinita, não há solo adjacente a este para poder receber as tensões aliviadas, pelo que apenas será possível redistribuição na direcção vertical, para a zona inferior ao fundo da vala (Figura 3.5).

Na Fase 2, a bentonite é substituída pelo betão ainda fresco, o solo recupera parte do deslocamento sofrido na fase anterior, deslocando-se no sentido oposto da Fase 1, como fora também observado nas modelações de Ng et al. (2004).

O processo de transferência de carga inverte-se, e parte das tensões transferidas para a

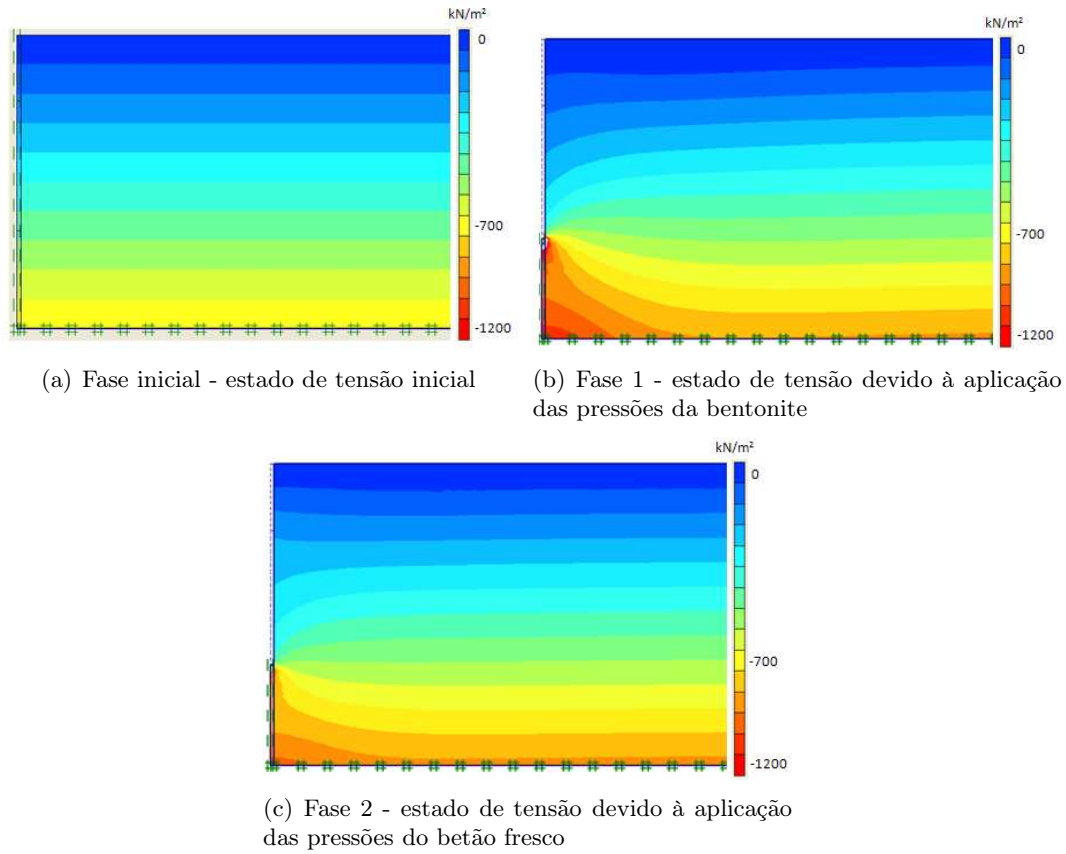


Figura 3.5: Tensões totais médias no maciço ao longo da instalação da parede.

base são recuperadas. Sendo as tensões horizontais devidas ao betão superiores à bentonite, o deslocamento horizontal dirige-se no sentido contrário ao da vala, como se pode observar na Figura 3.4. No entanto, não se desloca o suficiente para anular o deslocamento devido à Fase 1, pois para um solo de $K_0 = 1,5$ a tensão do solo ainda supera as pressões do betão fresco.

Na Figura 3.4 é ainda possível verificar a proximidade entre os resultados obtidos no presente trabalho e os de Faria e Guerra (2008).

Em ambas as fases construtivas da parede os deslocamentos horizontais e os assentamentos são idênticos, ou praticamente coincidentes, à excepção da zona inferior ao pé da parede, onde os deslocamentos horizontais aparentam ter algumas diferenças.

As pequenas diferenças observadas devem-se provavelmente às diferenças na malha de um cálculo para o outro, sendo que no cálculo mais recente foi adoptado um maior refinamento da malha, principalmente na zona mais próxima da parede.

3.4 Análise paramétrica das tensões iniciais

Como se verificou na secção anterior, a modelação dos efeitos da instalação da parede faz-se considerando as alterações do estado de tensão do maciço. Com isto, verifica-se que as

tensões iniciais poderão ser importantes para o estudo desses mesmos efeitos. Nesta secção consideraram-se, por isso, quatro valores distintos do coeficiente de impulso em repouso, $K_0 = 0,5, 1,0, 1,5$ e $2,0$.

3.4.1 Resultados obtidos e análise comparativa

Na Fase 1 (escavação e colocação das lammas bentoníticas), o solo tende a deslocar-se para dentro da vala, independentemente das tensões iniciais do maciço (Figura 3.6(a)).

À medida que o K_0 do solo aumenta, aumentam também os deslocamentos horizontais. Ng e Yan (1998) confirmam em trabalhos anteriores que, quanto maiores as tensões iniciais no terreno, maiores são os deslocamentos verificados.

Verifica-se que o deslocamento horizontal não se propaga abaixo do pé da parede.

Quanto ao assentamento do solo (Figura 3.6(a)), nesta mesma fase, o comportamento é idêntico. O assentamento aumenta com o aumento do coeficiente de impulso do solo e diminui com o aumento da distância do solo à parede. No entanto, nota-se que existe maior influência nos deslocamentos nesta direcção, visto que até a uma distância de 50 m o assentamento ainda é considerável. Sendo a altura (h) do painel de 20 m, verifica-se que o assentamento é considerável até $2,5h$, aproximadamente. Os valores máximos dos assentamentos verificam-se na proximidade da parede e variam desde 2,1 mm para $K_0 = 0,5$ até 13,7 mm para $K_0 = 2,0$. No trabalho de Ng e Yan (1999) estes valores significativos verificam-se apenas à distância de $1,5h$ da parede, sendo que este factor poderá possivelmente ser afectado pelas características do solo do maciço.

O Quadro 3.3 indica os valores dos deslocamentos máximos da Fase 1, para cada tipo de solo.

Quadro 3.3: Deslocamentos máximos da Fase 1 - Escavação e bentonite.

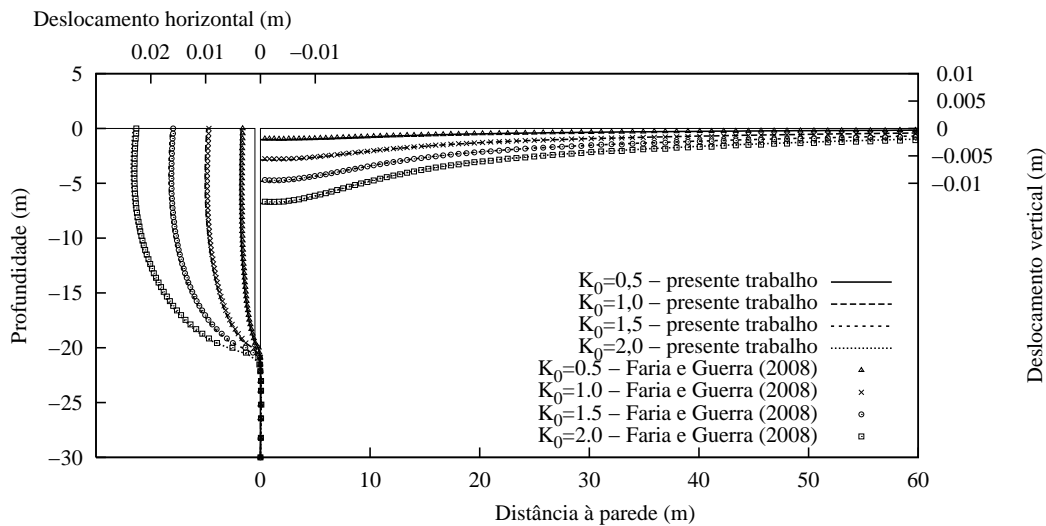
K_0	0,5	1,0	1,5	2,0
$\delta_{h_{max}}$ (mm)	3,7	10,0	16,7	23,6
$\delta_{v_{max}}$ (mm)	-2,1	-5,8	-9,7	-13,7

Na fase seguinte (Fase 2), quando se coloca o betão fresco substituindo a bentonite, a resposta do solo apresenta dois comportamentos distintos. Quando o coeficiente de impulso em repouso da argila é relativamente alto (1,5 e 2,0), o solo tende a movimentar-se para o interior da vala, podendo assentar consideravelmente à superfície. Mas, para valores de K_0 mais baixos (0,5 e 1,0), quando se aplicam as pressões do betão fresco, o solo tende a recuar vencido pelo impulso do betão, chegando a sofrer empolamento à superfície.

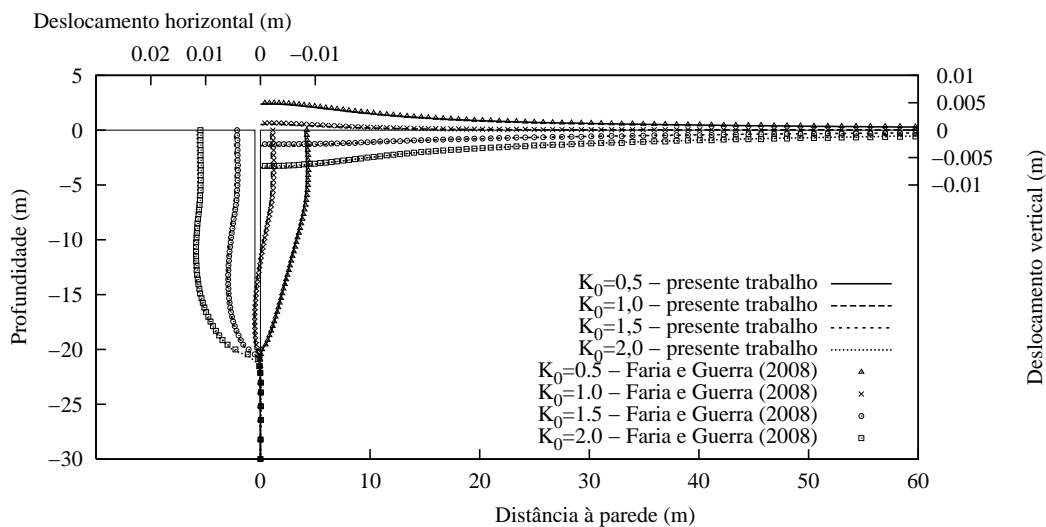
Se o coeficiente de impulso em repouso da argila for baixo, as pressões horizontais do solo são inferiores ao impulso gerado pelo betão fresco, provocando um deslocamento do solo para o seu interior e empolando a superfície. No entanto, se o coeficiente de impulso em repouso for alto, as tensões horizontais no solo são superiores às pressões aplicadas pelo

betão em estado líquido constatando-se o oposto. Pode-se concluir assim que, como Ng et al. (2004) a reacção do solo nesta fase depende suas tensões iniciais do maciço.

Como mostra a Figura 3.6(b), o solo desloca-se para dentro da vala nos casos de $K_0 = 0,5$ e $1,0$, com deslocamentos máximos de 8,4 mm e 2,0 mm respectivamente. Para os casos de $K_0 = 1,5$ e $2,0$ o deslocamento é em sentido contrário dos primeiros, com máximos de 6,0 mm e 12,0 mm respectivamente.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 3.6: Comparação dos resultados obtidos nos dois cálculos para o deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e para o assentamento da superfície do maciço, durante as duas fases de instalação da parede.

Os deslocamentos verticais à superfície do terreno (Figura 3.6(b)) têm um comportamento característico de empoamento para os solos com $K_0 = 0,5$ e $1,0$, os quais atingem os 4,8 mm e 1,1 mm respectivamente. Para os solos de $K_0 = 1,5$ e $2,0$, o deslocamento é descendente (assentamento) e toma valores máximos de 2,8 mm e 6,8 mm para cada um destes solos, respectivamente.

O Quadro 3.4 indica os valores dos deslocamentos máximos da Fase 2, para cada solo.

Quadro 3.4: Deslocamentos máximos da Fase 2 - Betão fresco.

K_0	0,5	1,0	1,5	2,0
$\delta_{h_{max}}$ (mm)	8,4	2,0	-6,0	-12,0
$\delta_{v_{max}}$ (mm)	-4,8	-1,1	2,8	6,8

Na última fase, do endurecimento do betão, não se alteram os deslocamentos e assentamentos em nenhum dos quatro diferentes solos, mantendo-se os valores iguais aos da Fase 2 para os deslocamentos horizontal e vertical. O betão curado preenche a vala, moldando-se contra o solo deformado da fase anterior.

É possível concluir então que a deformação geral do maciço é dependente das tensões iniciais.

Como é visível na Figura 3.6, as diferenças entre os resultados apresentados e os de Faria e Guerra (2008) são praticamente nulas. A variação mínima dos resultados deve-se, provavelmente, às diferentes malhas de elementos finitos utilizadas em cada cálculo.

3.5 Comparação dos modelos *WIP* e *WIM* quando aplicados à modelação de uma contenção escorada

3.5.1 Considerações iniciais

Na secção anterior estudou-se o comportamento de um maciço face à instalação de uma parede moldada. A pergunta que se coloca é se, ao executar uma obra constituída por uma parede que suporta uma escavação, a consideração da instalação dessa mesma parede será importante no valor dos deslocamentos do solo, ou se por sua vez, essa instalação poderá ser ignorada quando se prevê a resposta do solo ao longo do faseamento construtivo.

No caso da modelação de uma parede escorada e da respectiva escavação, a espessura desta é representada na sua totalidade (0,8 m), pois o eixo de simetria do modelo deixa de estar na parede, passando a estar efectivamente no centro da escavação geral. Admite-se uma escavação com 20 m de largura, que se modela tirando partido da simetria (Figura 3.7).

Em ambos os modelos adoptados (*WIP* e *WIM*) a escavação é faseada por vários níveis até à profundidade de 17 m, medidos desde a superfície do terreno. A cada nível de escavação procedeu-se à modelação da colocação do seu respectivo escoramento.

A escavação geral é então executada por cinco níveis consecutivos, com cotas equidistantes de 3,0 m, à excepção do primeiro nível de escavação que dista de 2,0 m da superfície do terreno. Os níveis de escoras são aplicadas sempre 0,5 m acima da cota de escavação, como ilustra a Figura 3.7. Admite-se que a cortina se encontra encastrada no terreno com o comprimento de 3,0 m.

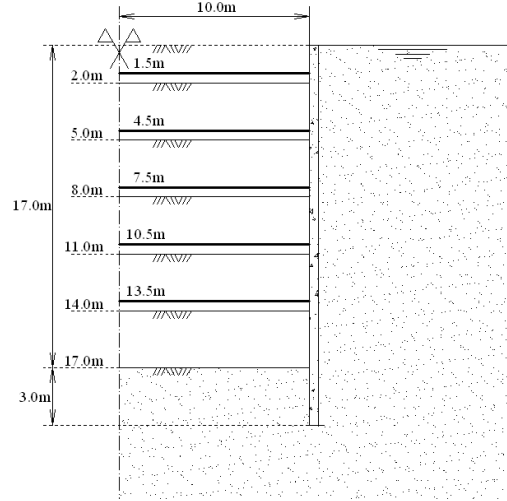


Figura 3.7: Geometria do modelo da parede moldada e escorada.

O modelo *WIP* é aplicado considerando que o betão tem como peso volúmico $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, igual ao peso volúmico do solo adjacente (argila). Tal hipótese permite obter um equilíbrio de tensões na interacção solo-parede. No segundo modelo, *WIM*, os elementos constituintes do betão tomam como peso volúmico $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, valor mais próximo ao real. O faseamento deste modelo permite que se estabeleça equilíbrio durante a cura do betão (Fase 3), antes da escavação do primeiro nível.

A malha de elementos finitos está representada na Figura 3.8. Entre a parede e o solo são colocados elementos de interface solo-parede. Estes elementos, como anteriormente descrito no Capítulo 2, permitem que exista deslocamento relativo entre os dois materiais. A sua activação é feita antes da primeira escavação, o que corresponde à Fase Inicial para o modelo *WIP* e à Fase 4 para o modelo *WIM*, pois este último modela primeiro a instalação da parede, onde não é necessário este tipo de elemento. Os deslocamentos relativos entre a parede e o solo no seu tardoz não serão discutidos neste trabalho, sendo avaliados apenas os do solo em termos deslocamentos absolutos.

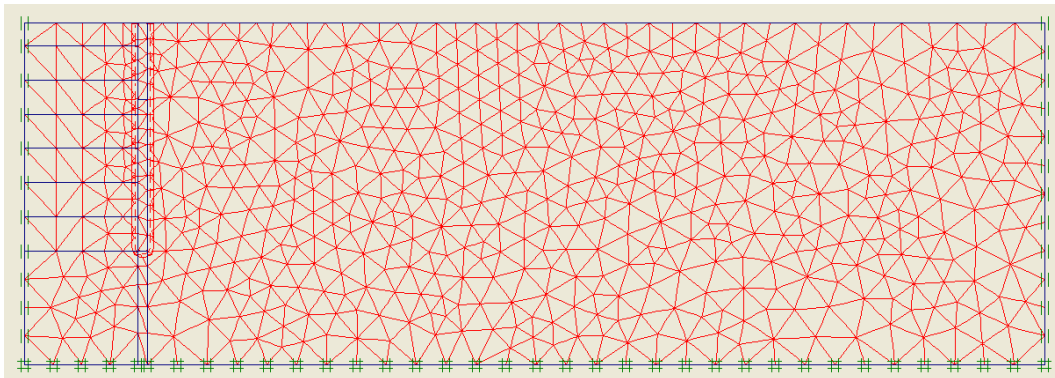


Figura 3.8: Malha de elementos finitos dos modelos da parede moldada e escorada, *WIP* e *WIM*.

As lamas bentoníticas têm $\gamma_{lb} = 12 \text{ kN/m}^3$ e o betão fresco $\gamma_B = 25 \text{ kN/m}^3$, e as pressões tomam os valores dados pela equação (2.2) dada por Ng (1992) assim como na secção 3.3.

As escoras utilizadas nestes dois modelos são elementos estruturais aplicados na fronteira da parede de contenção. A sua rigidez axial (EA) tem o valor de 420000 kN/m , e o seu comprimento real é de 20 m, sendo apenas representados 10 m, devido à simetria dos modelos.

A junta de interface solo-betão tem as propriedades do solo argiloso atribuídas, sendo que se irá comportar segundo o modelo de Mohr Coulomb. A sua espessura fictícia é de 0,1 vezes o tamanho médio dos elementos finitos da malha constituinte do maciço. A relação da adesão (R_{inter}) entre a parede e o solo é de 0,5.

3.5.2 Descrição e faseamento construtivo

Faseamento construtivo do Modelo *WIP*

Uma vez que se considera a parede previamente instalada na zona circundante à escavação a realizar, não existem na Fase Inicial, deslocamentos, assentamentos ou mesmo tensões residuais desse processo.

Na fase de execução de um nível de escavação são retirados os elementos de solo da geometria definida. A fase em que se coloca um nível de escoras é executada aplicando um elemento estrutural representativo dessa mesma escora.

O faseamento da escavação suportada por uma parede moldada e escorada *WIP* modela-se com a sequência seguinte e é ilustrado na Figura 3.9:

- Fase 1 - Activação da junta de interface solo/parede. Escavação no 1º nível, até à cota de 2,0 m.
- Fase 2 - Colocação da 1ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 1,5 m.
- Fase 3 - Escavação no 2º nível, até à cota de 5,0 m.
- Fase 4 - Colocação da 2ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 4,5 m;
- Fase 5 - Escavação no 3º nível, até à cota de 8,0 m.
- Fase 6 - Colocação da 3ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 7,5 m;
- Fase 7 - Escavação no 4º nível, até à cota de 11,0 m.
- Fase 8 - Colocação da 4ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 10,5 m.
- Fase 9 - Escavação no 5º nível, até à cota de 14,0 m.
- Fase 10 - Colocação da 5ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 13,5 m.

- Fase 11 - Escavação no 6º nível, até à cota de 17,0 m.

No último nível de escavação não se aplica escora. A cortina fica com uma altura de embebedimento de 3 m abaixo no último nível escavado, assegurando o encastramento do pé/base da parede moldada.

Faseamento construtivo do Modelo *WIM*

A Fase Inicial deste modelo considera que existe apenas solo, no qual se iniciará a construção da parede moldada.

O modelo segue a seguinte faseamento construtivo:

- Fase 1 - Escavação da vala para a parede e aplicação das pressões simulantes da colocação da bentonite.
- Fase 2 - Enchimento da vala com betão fresco substituindo a bentonite, a partir da aplicação das pressões correspondentes ao impulso do betão fresco contra o solo.
- Fase 3 - Endurecimento do betão, a partir da substituição das pressões pelos elementos finitos com as propriedades correspondentes ao betão armado endurecido.
- Fase 4 - Activação da junta de interface solo/parede. Escavação no 1º nível, até à cota de 2,0 m.
- Fase 5 - Colocação da 1ª escora meio metro acima no nível de escavação, à cota 1,5 m.
- Fase 6 - Escavação no 2º nível, até à cota de 5,0 m.
- Fase 7 - Colocação da 2ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 4,5 m.
- Fase 8 - Escavação no 3º nível, até à cota de 8,0 m.
- Fase 9 - Colocação da 3ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 7,5 m.
- Fase 10 - Escavação no 4º nível, até à cota de 11,0 m.
- Fase 11 - Colocação da 4ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 10,5 m.
- Fase 12 - Escavação no 5º nível, até à cota de 14,0 m.
- Fase 13 - Colocação da 5ª escora 0,5 m acima no nível de escavação, à cota 13,5 m.
- Fase 14 - Escavação no 6º nível, até à cota de 17,0 m.

A Figura 3.10 mostra as primeiras fases do processo construtivo do modelo *WIM*, as fases seguintes são iguais ao processo do modelo *WIP* (Figura 3.9).

Assim como no modelo anterior, no último nível de escavação não se aplica escora, pelas mesmas razões apresentadas.

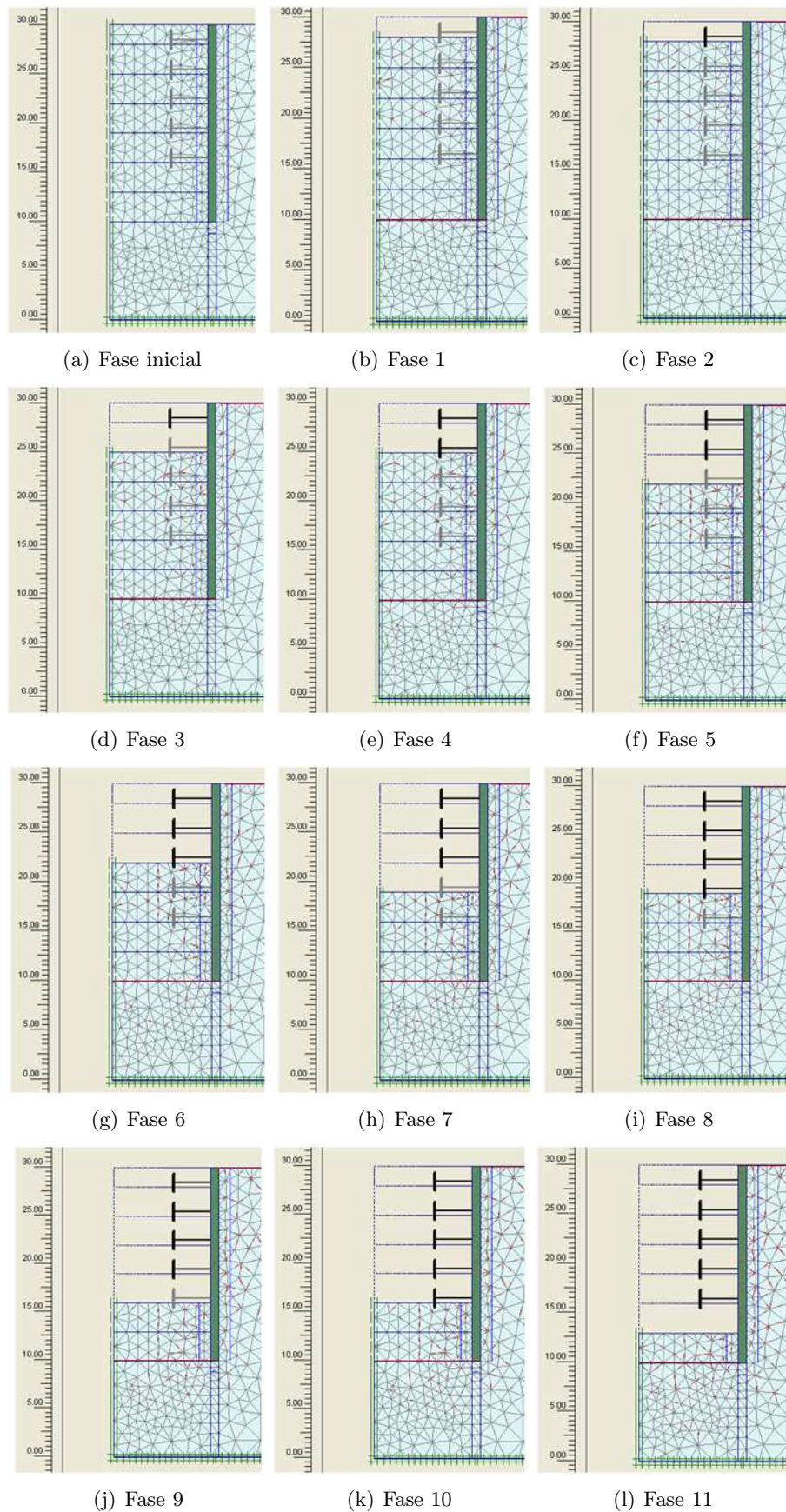


Figura 3.9: Faseamento construtivo do modelo *WIP*.

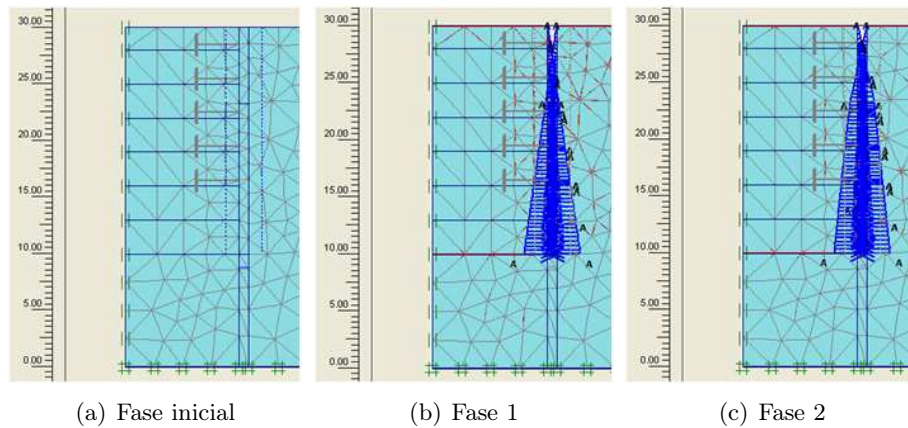


Figura 3.10: Início do faseamento construtivo do modelo *WIM*.

3.5.3 Resultados obtidos e análise comparativa

Análise dos resultados da modelação *WIP*

Os deslocamentos horizontais do terreno no tardo da parede evoluem de forma crescente, para dentro da escavação, à medida que evolui o processo de escavação. A cada nível de escavação o solo vai adoptando uma deformação côncava desde o topo até ao último nível de escavação até aí executado.

Como se pode observar na Figura 3.11, a parede apresenta diferentes comportamentos entre a zona abaixo do nível escavado e acima do nível escavado. A zona inferior do nível de escavação sofre deslocamentos horizontais de desenvolvimento linear, na altura da parede. No caso da Fase 1 (1º nível de escavação) nota-se que praticamente toda a parede tem um deslocamento linear. À medida que a escavação vai avançando, na parte superior vai-se desenvolvendo uma deformada côncava em que a parede roda em torno do seu topo e do seu pé.

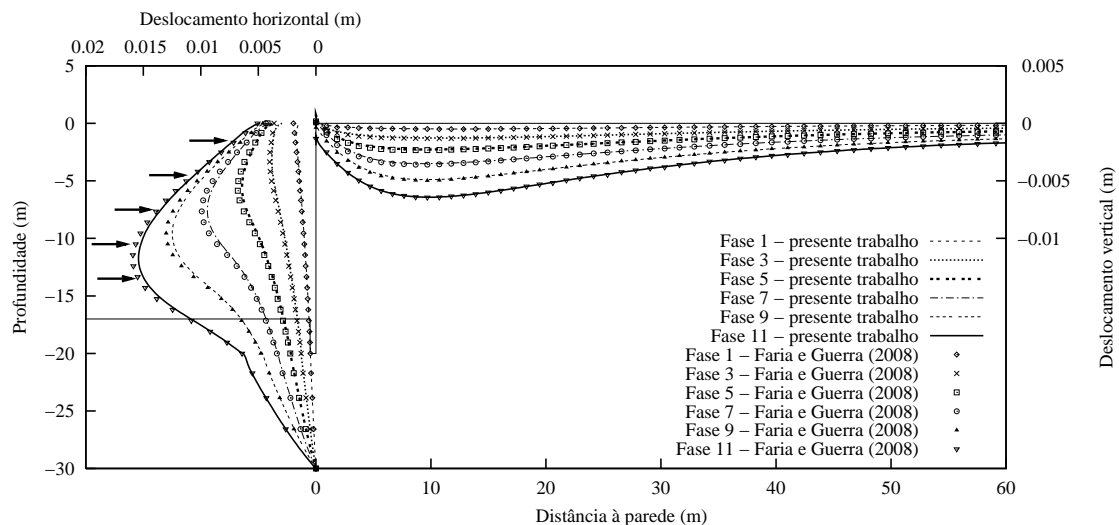


Figura 3.11: Deslocamentos horizontais e assentamentos do modelo *WIP*.

Os deslocamentos horizontais abaixo do nível de escavação dependem essencialmente da rigidez relativa solo-parede. Para os mesmos deslocamentos acima do nível de escavação os factores condicionantes são a altura de solo escavada em cada nível e a rigidez das escoras aplicadas após cada nível de escavação.

Os deslocamentos verticais, ou assentamentos, na superfície do terreno dependem directamente dos deslocamentos horizontais da parede e do solo no seu tardoz. Enquanto o solo se desloca para a frente, a superfície do terreno assenta proporcionalmente a esse deslocamento. A zona de assentamento máximo situa-se aproximadamente à superfície do maciço a uma distância de 8,0 m da parede, o correspondente a $0,4h$, sendo h a altura da parede. A deformada da superfície do maciço tem, em todas as fases de construção, uma forma curvilínea que, com o aumento da distância à parede, tende para valores mais baixos, próximos de zero (Figura 3.11).

Análise dos resultados da modelação WIM

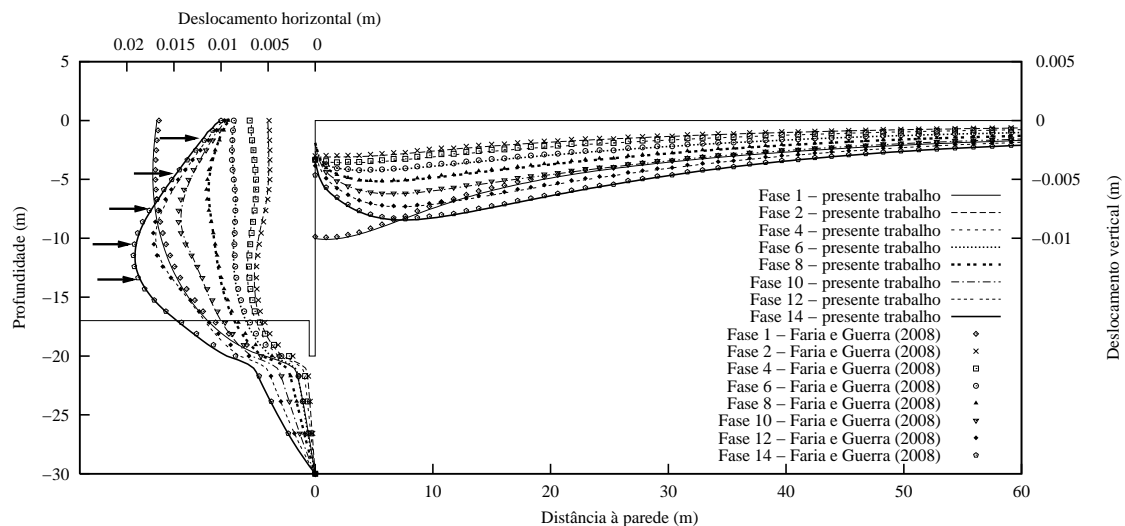
Após execução do faseamento descrito na secção 3.5.2 é possível analisar o comportamento do maciço em cada fase de construção.

Na primeira fase, procede-se à escavação da vala e ao seu preenchimento com bentonite. O seu comportamento é comparável ao analisado na secção 3.3.4, em que apenas se estuda a instalação da parede, sendo que o valor máximo (17,2 mm) muito próximo do anteriormente verificado (16,7 mm), na fase da colocação da bentonite. O que poderá diferenciar estas duas análises, nesta fase construtiva, é o facto de que na secção 3.3.4 a parede ser modelada pelo seu eixo de simetria, considerando-se apenas metade da sua espessura, enquanto que no modelo presente a parede é modelada considerando toda a sua espessura (0,8 m), visto que o eixo de simetria se situa agora no centro geométrico da escavação geral.

O mesmo se pode verificar na Fase 2. O betão fresco actua sobre as paredes da vala provocando um recuo de cerca de 60 a 70% do valor do deslocamento horizontal máximo da Fase 1, acompanhado pelo levantamento da superfície do terreno com a mesma ordem de valores percentuais. Na Figura 3.12 pode-se observar o comportamento do solo para o processo de construção do modelo WIM.

O que se pode observar nas fases seguintes é que, à medida que se escava um nível, parte do solo vai aliviando e movendo-se na direcção da escavação. A colocação de uma escora, após cada nível de escavação executado, evita que o solo colapse com o decorrer das seguintes fases de construção.

O assentamento da superfície do maciço, a partir da Fase 3 evolui na direcção descendente, aumentando a cada fase. Mas o seu aspecto deformado apresenta também mais um ponto de rotação, o topo da parede. Fazendo uma analogia visual, pode-se dizer que na Fase 1 a superfície do terreno aparenta a deformada característica de uma viga duplamente encastrada, enquanto que nas fases seguintes, a sua deformada aparenta-se com uma viga apoiada-encastrada, permitindo a rotação do lado esquerdo.

Figura 3.12: Deslocamentos horizontais e assentamentos do modelo *WIM*.

A diferença entre os dois modelos é significativa, como é possível de constatar comparando as Figuras 3.11 e 3.12. A diferença entre os deslocamentos máximos e as suas variações entre fases de construção é também comparável nos Quadros 3.5 e 3.6.

No modelo *WIM*, enquanto se inicia o 1º nível de escavação, o maciço já se encontra em estado alterado e com deformações e assentamentos consideráveis. Por sua vez, o modelo *WIP* inicia o 1º nível de escavação com o maciço inalterado. Pelo que, destas diferenças resultam a que no final da execução da escavação, os valores dos deslocamentos sejam maiores para o modelo *WIM*. Verifica-se também que o modo como o maciço se deforma ao longo de todo o faseamento construtivo é evidentemente diferente entre os dois modelos.

Quadro 3.5: Deslocamentos horizontais máximos no tardo da parede (δh_{max}) e variação destes (Δ_H) durante o faseamento construtivo para as modelações *WIP* e *WIM*.

Modelo	Fase	bent.	b. fresco	1ª esc.	2ª esc.	3ª esc.	4ª esc.	5ª esc.	6ª esc.
<i>WIP</i>	δh_{max} (mm)	-	-	1,72	3,82	6,42	9,43	12,49	15,42
	Δ_H (mm)	-	0,00	1,72	2,10	2,60	3,01	3,06	2,93
<i>WIM</i>	δh_{max} (mm)	17,24	6,45	7,19	8,81	11,31	14,25	16,93	19,14
	Δ_H (mm)	-	10,79	0,74	1,62	2,50	2,94	2,68	2,21

Quadro 3.6: Assentamentos máximos na superfície do maciço (δv_{max}) e variação destes (Δ_V) durante o faseamento construtivo para as modelações *WIP* e *WIM*.

Modelo	Fase	bent.	b. fresco	1ª esc.	2ª esc.	3ª esc.	4ª esc.	5ª esc.	6ª esc.
<i>WIP</i>	δv_{max} (mm)	-	-	0,49	1,28	2,27	3,50	4,90	6,42
	Δ_V (mm)	-	0,00	0,49	0,79	0,99	1,23	1,41	1,52
<i>WIM</i>	δv_{max} (mm)	10,10	3,12	3,50	4,25	5,17	6,23	7,33	8,45
	Δ_V (mm)	-	6,98	0,47	0,66	0,92	1,06	1,10	1,12

Comparando os modelos *WIP* e *WIM* desta modelação, pode-se observar que a consideração da instalação da parede pode alterar significativamente os deslocamentos finais do

maciço a suportar. Pela observação da Figura 3.13 pode-se concluir que, a maior diferença entre os dois modelos dá-se logo no início da escavação, correspondente à Fase 1 em *WIP* e à Fase 4 em *WIM*.

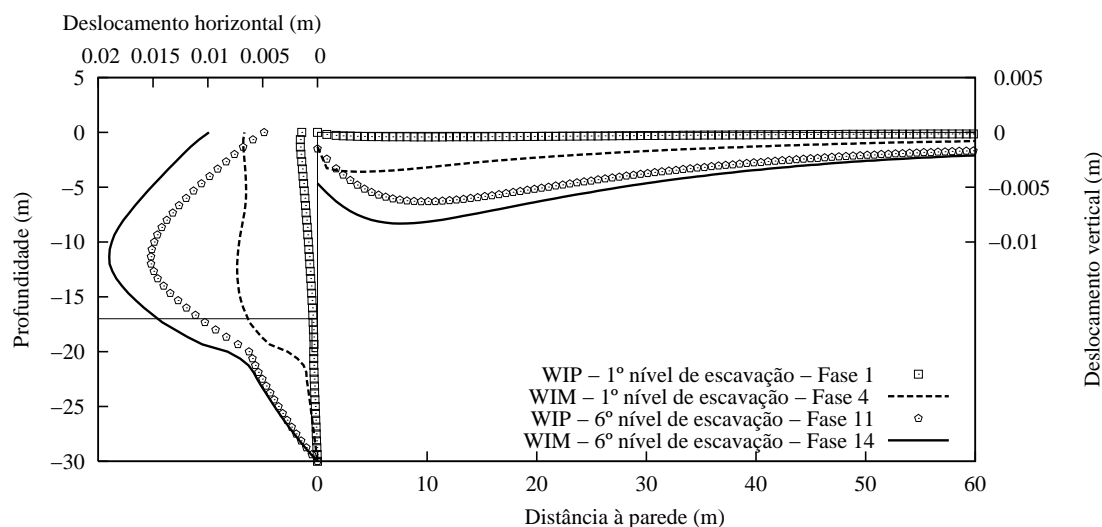


Figura 3.13: Comparação entre o modelo *WIM* e *WIP* para os deslocamentos horizontais e assentamentos com o modelo *2D*, nas fases do 1º e último níveis de escavação.

Os deslocamentos horizontais do solo no tardo da parede instalada e os assentamentos à superfície do maciço, para o modelo *WIM*, são consideravelmente maiores do que em *WIP*, devido ao próprio efeito da instalação da parede. Durante a descompressão do solo e o consequente alívio de tensões no maciço são desenvolvidas deformações no mesmo, o que não acontece no modelo *WIP*. À medida que os níveis de escavação avançam essa diferença diminui relativamente ao primeiro nível de escavação. No entanto, quando termina o faseamento, no último nível de escavação, a diferença entre os deslocamentos horizontais e os assentamentos entre os dois modelos, embora menor, ainda é bastante significativa.

Schafer e Triantafyllidis (2006) observaram anteriormente, numa modelação de uma obra em Taipei, onde se previu que os deslocamentos aumentavam de 5 a 15% do modelo *WIP* para *WIM* na 1ª fase de escavação. No presente trabalho o que se verifica é que, na 1ª escavação há uma diferença entre os modelos de 76% no valor do deslocamento horizontal, que vai diminuindo ao longo das escavações, obtendo um valor 19% maior de *WIP* para *WIM*, na última escavação. Em relação aos assentamentos este valor máximo vai dos 86% para os 26% na última escavação.

O aumento da força em cada escora, ao longo do faseamento construtivo, Figura 3.14, mostra como de fase para fase o terreno suportado tende em deslocar-se cada vez mais, aumentando o estado de compressão destas. As escoras mais esforçadas são E2 e E3, que estão situadas à cota 4,5 m e 7,5 m, respectivamente. A sua compressão elevada deve-se a estarem situadas na zona de maiores deslocamentos da parede, absorvendo assim maiores tensões de compressão.

Entre os dois modelos verifica-se, na Figura 3.14, que a modelação *WIP* apresenta

maiores níveis de compressão das escoras ao longo de todo o processo de escavação. Isto deve-se a que, como é possível constatar no Quadro 3.5, para além da modelação *WIM* apresentar maiores deslocamentos horizontais, é no modelo *WIP* que estes variam mais entre cada fase de escavação (Δ_H). Por esse facto se pode concluir que o nível de compressão das escoras está directamente relacionado com os deslocamentos horizontais relativos do solo situado no tardo da parede, durante o processo de escavação.

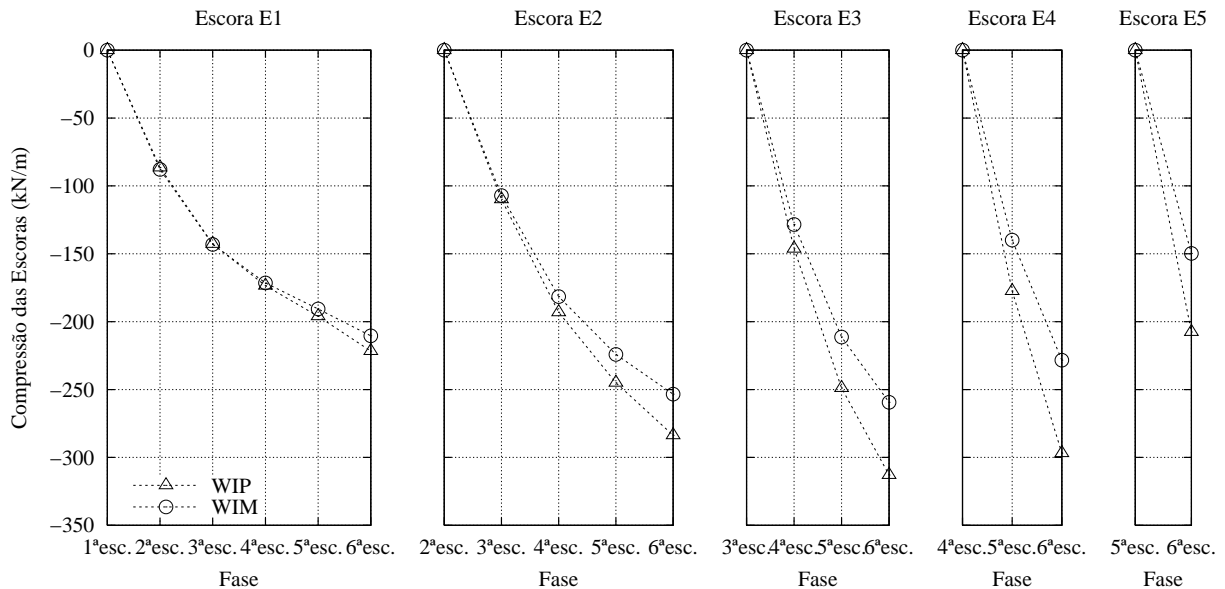


Figura 3.14: Desenvolvimento das forças nas escoras (E1, E2, E3, E4 e E5) durante as várias fases de escavação dos modelos *WIP* e *WIM*.

Numa modelação feita por Powrie e Li (1991) verificou-se que as tensões instaladas no solo antes da escavação são um factor importante nos valores de compressão das escoras.

Nas Figuras 3.11 e 3.12 estão sobrepostas a modelação feita por Faria e Guerra (2008) com a modelação efectuada neste trabalho, para o modelo *WIP* e *WIM*, respectivamente. Assim como nas secções 3.3.4 e 3.4.1 verifica-se que os modelos correspondentes têm resultados aproximados, confirmando assim a sua veracidade.

As pequenas diferenças dos resultados obtidos sugerem que, nos dois trabalhos foram utilizados diferentes níveis de refinamento da malha de elementos finitos aplicada aos modelos.

3.6 Conclusões

Apresentou-se o modo como a modelação 2D da execução das paredes moldadas pode ser realizado (modelo *WIM*). Como se verá, essa metodologia poderá igualmente ser usada, nos seus aspectos essenciais, para modelação 3D.

Aplicou-se a metodologia referida a um caso de estudo numérico 2D, já publicado,

tendo-se procedido à comparação dos resultados com os agora obtidos. Verificou-se uma quase coincidência de resultados, o que se atribui à idêntica adopção metodológica de modelação.

Os cálculos realizados pretendiam observar o efeito de transferência de carga na direcção vertical, descrito no Capítulo 2, quando se executa a escavação da vala. Permite igualmente observar o efeito que as tensões iniciais têm nos deslocamentos do maciço durante a execução da parede (modelo *WIM*). Globalmente, pode afirmar-se que, para K_0 baixos, a fase de betonagem tende a causar deslocamentos horizontais no sentido do terreno e empolamentos na superfície do solo. Para K_0 elevados, esta fase de construção dá origem a deslocamentos horizontais no sentido da vala e assentamentos da superfície do terreno.

A modelação de uma escavação escorada usando as duas metodologias (*WIP* e *WIM*) permitiu concluir que, pelo menos no que respeita ao caso *2D*, a consideração dos efeitos da instalação da parede pode afectar significativamente os deslocamentos do maciço suportado e as cargas nas escoras. Registe-se, em particular, que o modelo *2D* usado, os deslocamentos na fase de escavação da vala e preenchimento com bentonite são da mesma ordem de grandeza dos deslocamentos finais, quando o processo da escavação termina.

Capítulo 4

Efeitos tridimensionais da execução de paredes moldadas no terreno

4.1 Introdução

Este capítulo pretende abordar a modelação tridimensional da execução de paredes moldadas que, para o caso bidimensional, foi apresentado no Capítulo 3.

O estudo tridimensional inicia-se pela reprodução do problema bidimensional anteriormente modelado, através da análise de uma fatia de 1 m de largura, de forma a verificar o modelo tridimensional. Segue-se a modelação de um painel com 5 m de largura e a análise dos efeitos da sua instalação, sob o ponto de vista dos deslocamentos e das tensões no maciço. Finalmente, considera-se a instalação de vários painéis consecutivos e analisa-se igualmente os seus efeitos durante o processo de instalação.

4.2 Reprodução do estudo bidimensional num caso 3D

Conforme referido, o primeiro modelo deste capítulo é constituído por uma fatia de terreno de 1 m de largura com a geometria ilustrada na Figura 4.1, em que o painel tem a mesma largura do modelo, de modo a replicar o caso bidimensional em deformação plana apresentado no Capítulo 3.

Esta modelação tridimensional com 1 m de largura é, assim, aplicada ao caso estudado no Capítulo 3 na secção 3.5, em que se modelou a execução de uma escavação suportada por uma parede moldada e escorada, e com a execução da parede simulada através dos dois métodos já referidos - *WIP* e *WIM*. Visa verificar que o modelo 2D é adequadamente reproduzido através do programa de cálculo tridimensional, por forma a poder garantir-se que os resultados 3D, posteriormente apresentados, são comparáveis com os do estudo 2D.

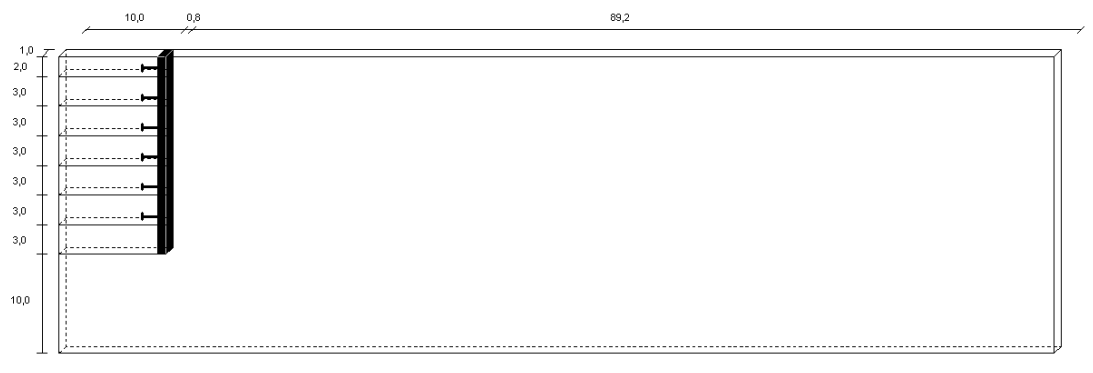


Figura 4.1: Geometria do modelo tridimensional com largura de 1 m (valores em metros).

4.2.1 Malha de elementos finitos e considerações gerais da modelação

Procurou-se que a malha de elementos finitos utilizada para a modelação tridimensional tivesse um grau de refinamento próximo do utilizado na modelação $2D$, por forma a eliminar, na medida do possível, este aspecto como fonte de eventuais diferenças entre os resultados obtidos. No entanto, mesmo para além dos tipos de elementos finitos usados, são impossíveis de evitar as diferenças das malhas, pois a modelação $3D$ ficaria bastante mais pesada. Por isso optou-se pelo refinamento da malha na zona mais próxima da parede e o alargamento da mesma nas zonas mais distantes, de modo a otimizar o modelo, como se pode observar na Figura 4.2.

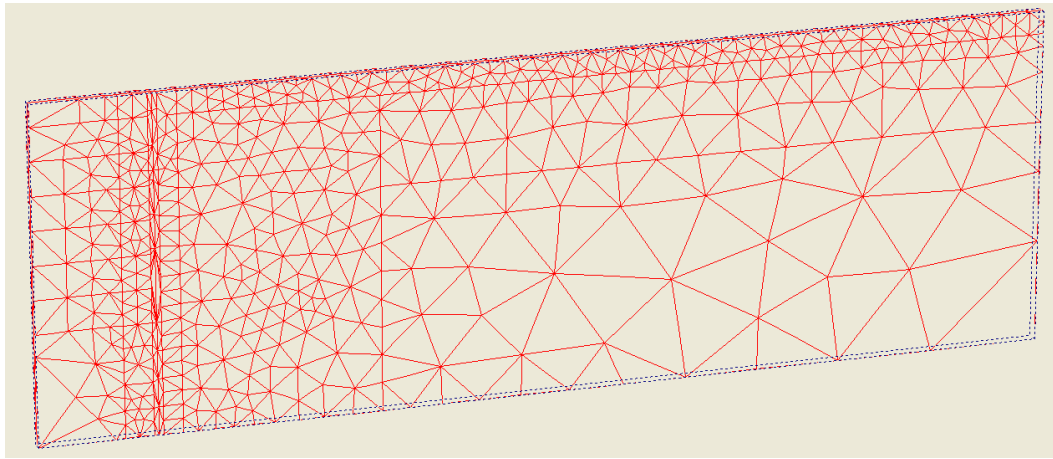
Os materiais utilizados são os mesmos utilizados nos modelos da secção 3.5, assim como os procedimentos de construção da parede e da escavação.

Por sua vez, a colocação das estruturas que simulam as escoras é ligeiramente diferente. Estes elementos, que no modelo bidimensional eram definidos por uma rigidez por unidade de comprimento (com o valor de $420000kN/m$) e, portanto, modelados como se de lajes contínuas se tratasse, são agora aplicados em pontos específicos da parede construída e com rigidez absoluta. Como o modelo desta secção tem apenas 1 m de largura, as escoras têm uma rigidez de $420000kN$ por escora, admitidas exactamente a meio da largura da *fatia* (0,5 m).

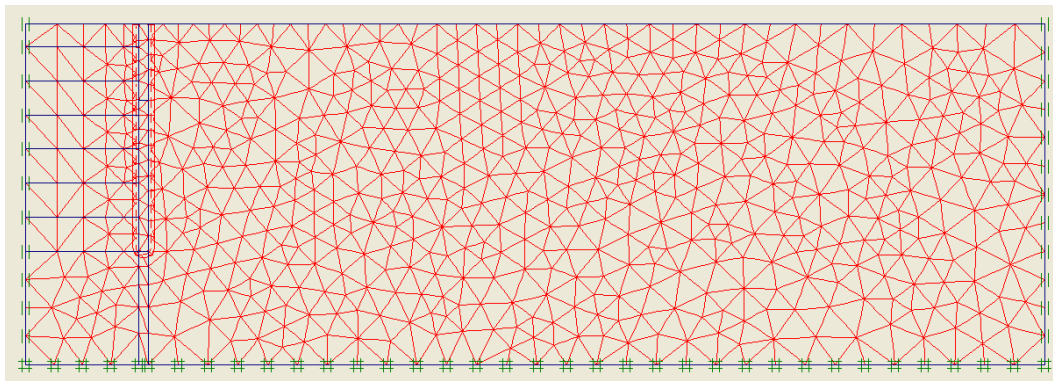
4.2.2 Resultados obtidos e análise comparativa

Admitindo que a parede moldada se encontra previamente instalada no maciço (modelo *WIP*), executa-se a escavação geral seguida da colocação dos vários níveis de escoras. O processo inicia então a escavação do primeiro nível sem que o maciço tenha sofrido qualquer efeito da instalação da parede, estando este em estado de tensão de repouso inalterado e indeformado.

Na Figura 4.3(a) observa-se os deslocamentos horizontais da parede e os assentamentos da superfície do terreno, obtidos do cálculo ao longo do faseamento construtivo. Estes



(a) Modelo 3D



(b) Modelo 2D usado no Capítulo 3

Figura 4.2: Comparação entre as malhas de elementos finitos 3D e 2D.

resultados encontram-se sobrepostos aos resultados anteriormente obtidos no Capítulo 3, do modelo 2D. Pode-se então confirmar com esta figura que os resultados desta modelação com o modelo *WIP* são idênticos aos da parede modelada bidimensionalmente.

Considerando agora a modelação da instalação da parede moldada através do modelo *WIM*, tal como descrito na secção 3.5.2, obtêm-se os resultados que se apresenta na Figura 4.3(b). Nesta figura incluem-se também os resultados dos cálculos bidimensionais anteriormente obtidos no Capítulo 3.

Comparando a modelação da *fatia* face à modelação 2D executada no capítulo anterior, verifica-se, pela Figura 4.3(b), que o comportamento de ambos os modelos é idêntico, assim como observado também no modelo *WIP* na Figura 4.3(a).

Os resultados apresentados constituem, assim, um teste ao modelo tridimensional, que foi capaz de reproduzir o mesmo comportamento modelado através do modelo bidimensional.

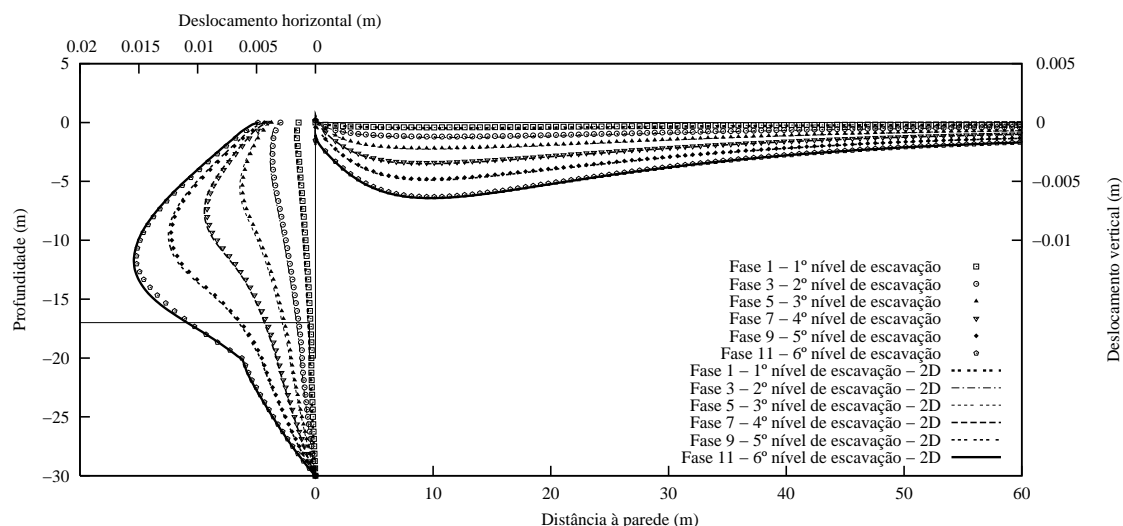
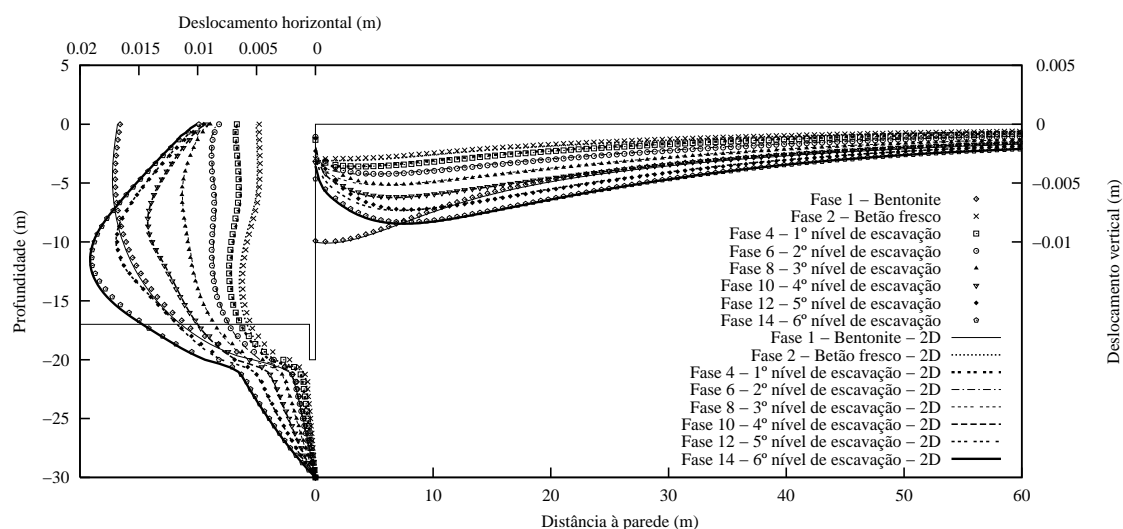
(a) Modelo *WIP*.(b) Modelo *WIM*.

Figura 4.3: Deslocamentos horizontais e assentamentos para o modelo tridimensional com largura de 1 m, comparados com os resultados da modelação bidimensional, para *WIP* e *WIM*.

4.3 Aplicação do modelo *WIM* a um caso de um painel com 5 m de comprimento

A secção anterior considerou apenas a reprodução das condições da modelação *2D*, pelo que não foram tidas em conta na análise os efeitos tridimensionais da instalação da parede moldada no maciço. O estudo que se segue simula a instalação de um painel com largura de 5 m de parede moldada num maciço terroso.

Dado que apenas se considera um painel, é possível considerar dois planos de simetria, modelando-se apenas 1/4 do problema.

Aplica-se nesta secção a sequência construtiva definida na secção 3.3 e admite-se as

propriedades dos materiais indicadas no Quadro 3.2.

4.3.1 Optimização da malha de elementos finitos tridimensional

O estudo das malhas é feito com a aplicação de 5 diferentes malhas aplicadas a duas geometrias ilustradas na Figura 4.4.

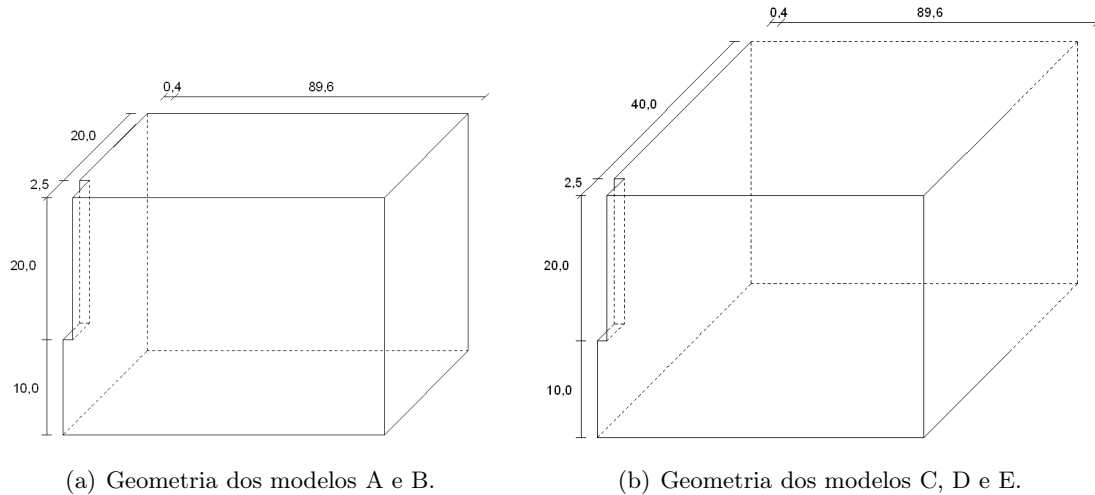


Figura 4.4: Geometria dos modelos tridimensionais para uma parede moldada com 5 m de largura (valores em metros).

Optou-se por estudar a variação de dois factores: a largura adjacente ao painel e o refinamento da malha do painel instalado. Com a geometria da Figura 4.4(a), em que se considera uma largura de solo adjacente ao painel de 20 m ($1h$), foram preparados os Modelos A e B:

- Modelo A: painel com pouco refinamento, Figura 4.5(a).
- Modelo B: painel com maior refinamento, Figura 4.5(b).

Com a geometria da Figura 4.4(b), em que a largura adjacente ao painel é de 40 m ($2h$), foram preparados os Modelos C, D e E:

- Modelo C: painel com pouco refinamento, Figura 4.5(c).
- Modelo D: painel com maior refinamento, Figura 4.5(d).
- Modelo E: solo e painel com pouco refinamento, Figura 4.5(e).

Os resultados deste estudo podem ser observados na Figura 4.6, durante as duas primeiras fases de construção da parede. Tanto na fase de colocação das lammas bentoníticas como na fase de betonagem do painel, os cinco modelos apresentam um comportamento deformado bastante próximo, pelo menos no plano central do painel.

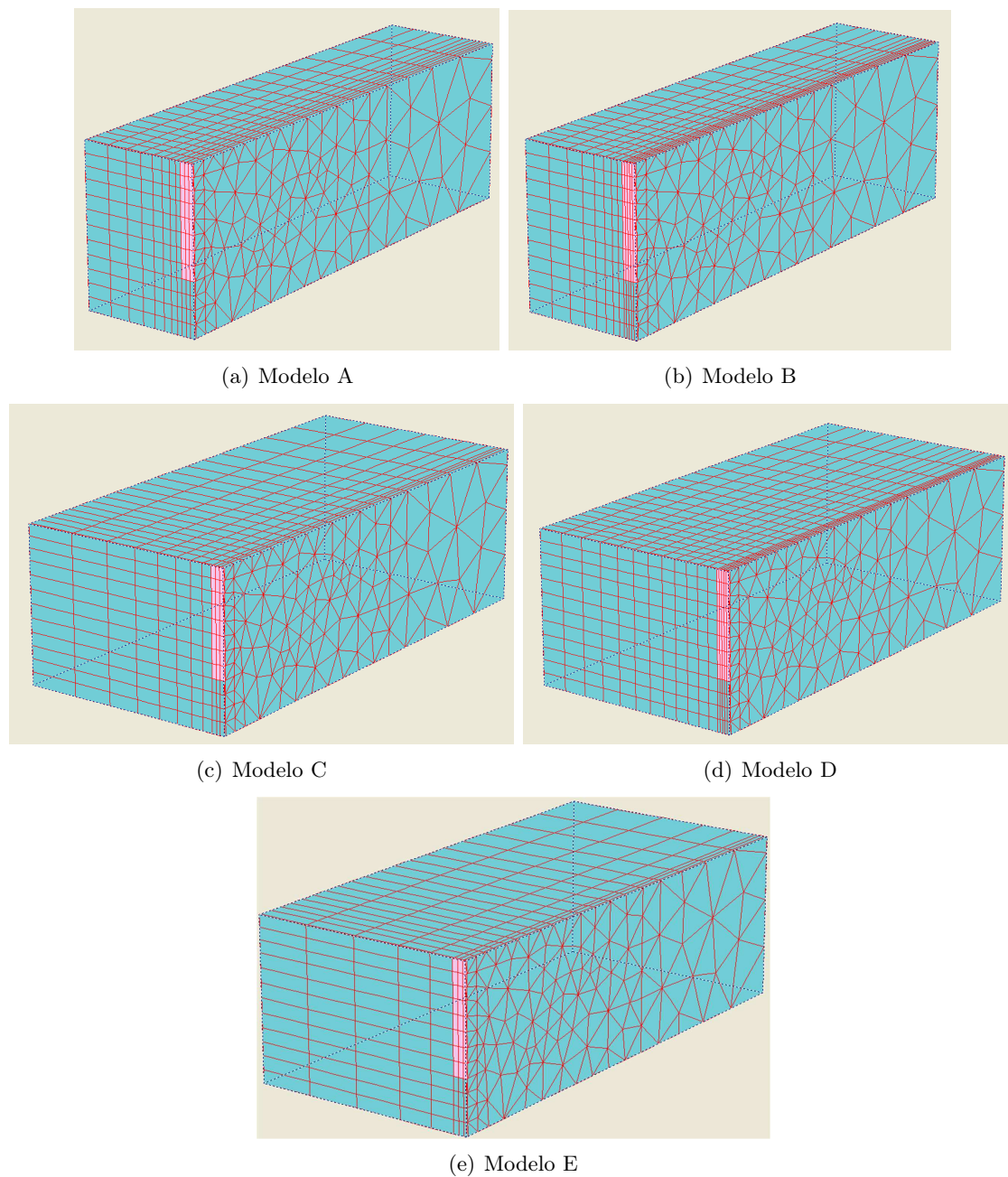
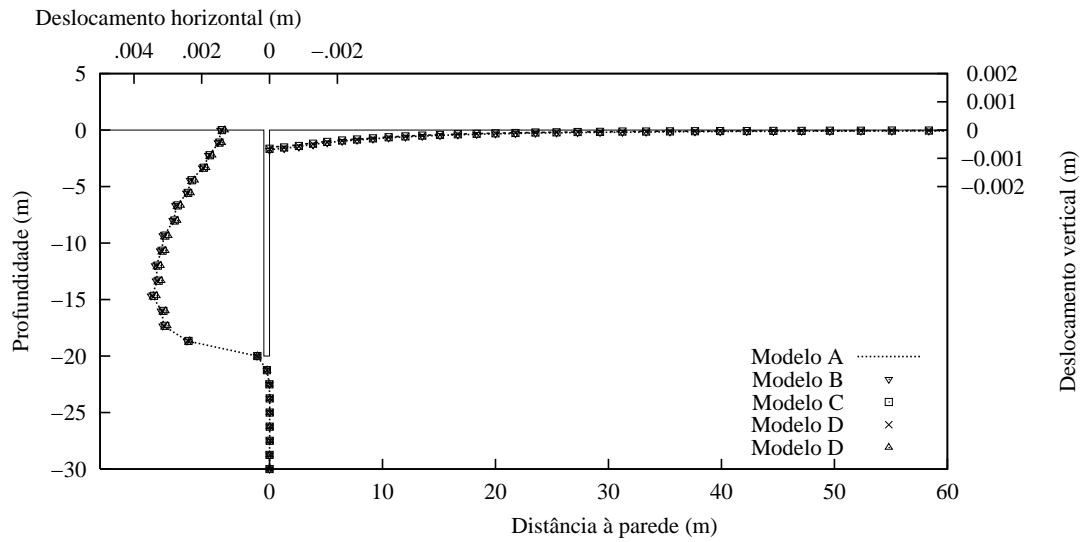
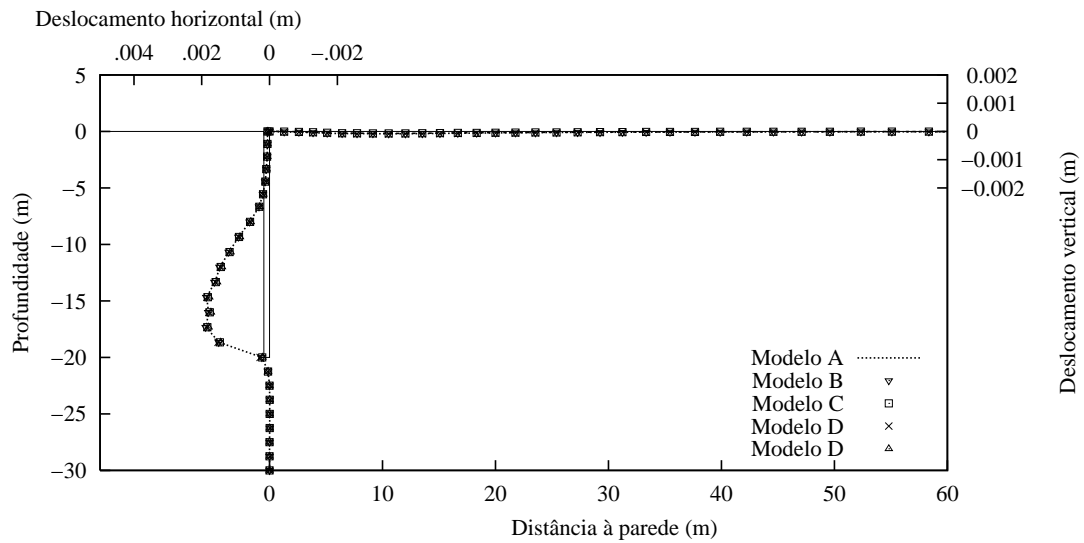


Figura 4.5: Malha de elementos finitos para os cinco modelos propostos, no estudo da instalação de uma parede moldada de $5m$ de comprimento.



(a) Fase da escavação da vala e colocação das lamas bentoníticas



(b) Fase da colocação do betão em estado líquido

Figura 4.6: Resultados dos testes das malhas para o modelo *WIM*: deslocamentos horizontais no tardo da parede e deslocamentos verticais na superfície do terreno.

Outro resultado analisado foi a planta dos assentamentos à superfície do maciço durante a fase de escavação da vala. A Figura 4.7 mostra que, nos modelos mais pequenos (A e B) o bolbo das deformações verticais ultrapassa os seus limites, enquanto que nos modelos com 40 m de largura (adjacente ao painel), C, D e E, os deslocamentos verticais ficam bem representados, dentro dos limites dos modelo.

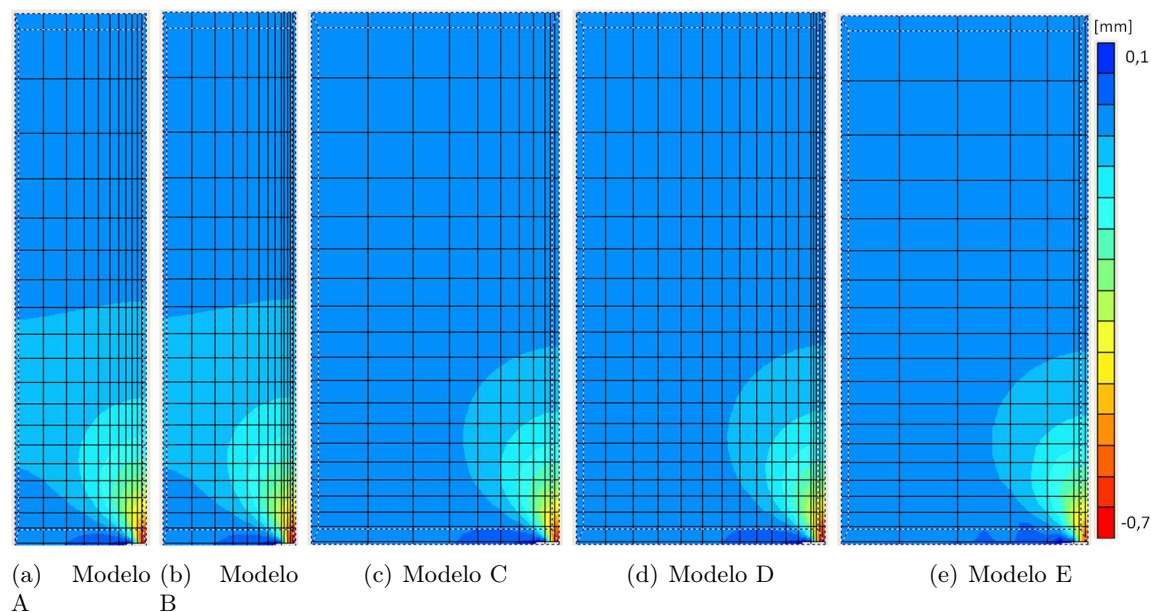


Figura 4.7: Resultados dos testes das malhas para o modelo *WIM*: deslocamentos verticais na superfície do maciço durante a fase de escavação do painel.

A partir das Figuras 4.6 e 4.7 pode-se concluir que os modelos com largura adjacente ao painel de 40 m (C, D e E) têm condições geométricas mais adequadas para obter os resultados do efeito da instalação de uma parede moldada no maciço. No entanto, entre esses três modelos, verifica-se que o refinamento da malha do painel não traz alterações significativas aos resultados dos deslocamentos. Assim, tendo em conta todos estes resultados, escolhe-se o modelo E, como o modelo com a malha adequada para o estudo do problema, pois é o modelo com largura de 40 m com menor refinamento da malha na zona adjacente ao painel, o que também poderá permitir um modelo mais leve para o programa de cálculo.

Pela Figura 4.8 identificam-se os eixos de modelação tridimensional utilizados. O eixo *X* é o eixo horizontal com desenvolvimento no comprimento do modelo, o eixo *Y* é o eixo vertical e o eixo *Z* é o correspondente à terceira dimensão adicionada, a largura, com desenvolvimento também na horizontal.

4.3.2 Aplicação do modelo obtido: faseamento

Escolhida a malha de elementos finitos procedeu-se à sua aplicação propriamente dita no caso de estudo da instalação um painel de parede moldada, com 5 m de largura. A Figura 4.9 ilustra a vala escavada, no modelo tridimensional, onde, para futura referência, são identificadas as faces da mesma: face lateral, face frontal e fundo de vala.

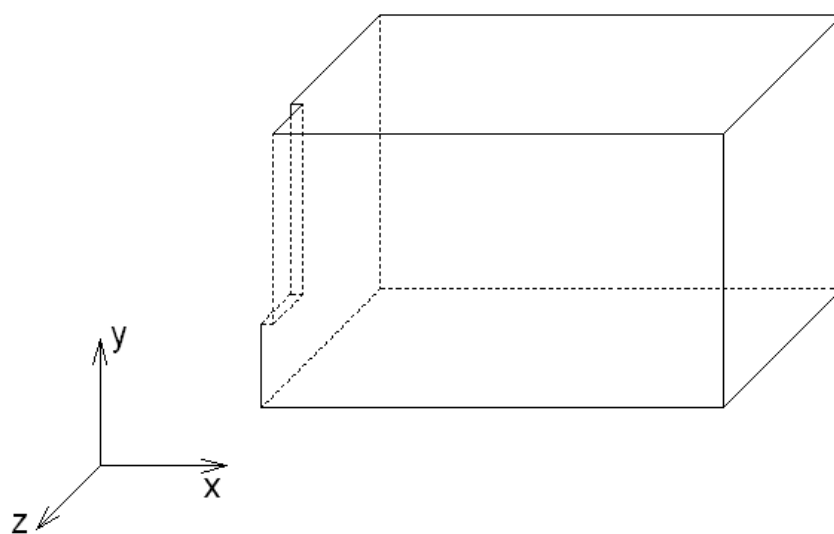


Figura 4.8: Identificação dos eixos de modelação.

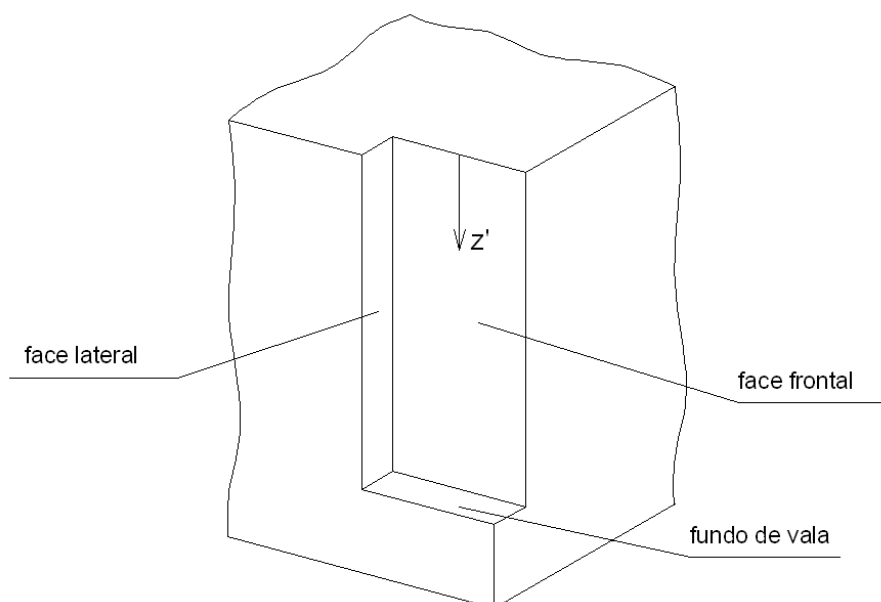


Figura 4.9: Faces da vala tridimensional com 5 m de largura.

A primeira fase passa pela remoção do solo e abertura da vala da parede, com simultânea colocação da bentonite. Esta é modelada por aplicação de pressões hidrostáticas segundo a equação 2.1, referida no Capítulo 2, com $\gamma_{lb} = 12 \text{ kN/m}^3$, o que dá origem às pressões ilustradas na Figura 4.10(a). Na face frontal e lateral os diagramas de pressões têm a forma triangular, correspondente à equação enunciada, no fundo de vala as pressões são constantes e têm o valor de 240 kPa . Faz-se notar que no modelo tridimensional a aplicação da pressão é feita nas duas faces indicadas.

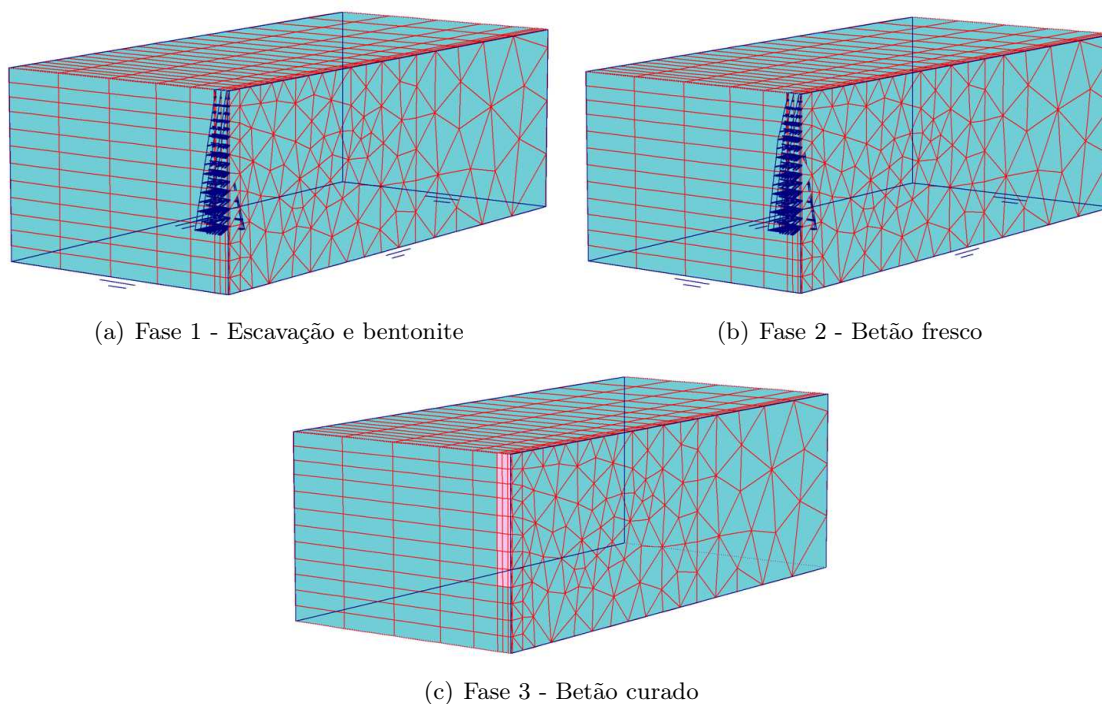


Figura 4.10: Fases construtivas da instalação de uma parede de 5 m de largura, modelada por dois eixos de simetria.

A betonagem do painel é modelada pela aplicação de um diagrama bi-linear definido pela equação 2.2, apresentada no Capítulo 2, com $\gamma_{lb} = 12 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_B = 25 \text{ kN/m}^3$ e uma altura crítica (h_c) de 6,67 m ($h/3$). O resultado deste diagrama aplicado na vala está representado na Figura 4.10(b). No fundo de vala as pressões aplicadas são uniformes, com o valor de $367,7 \text{ kPa}$.

A terceira e última fase (Figura 4.10(c)) é referente à cura do betão colocado na vala, por colocação de elementos finitos com as propriedades físicas do betão armado (com comportamento elástico-linear).

4.3.3 Resultados: análise da alteração do estado de tensão do maciço durante a instalação da parede

A evolução das tensões horizontais e verticais do maciço, ao longo do processo de instalação da parede pode ser observada nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 (σ_x , σ_z e σ_y , respecti-

vamente). Durante as fases construtivas o maciço altera o seu estado de tensão, provocando os deslocamentos analisados da secção seguinte.

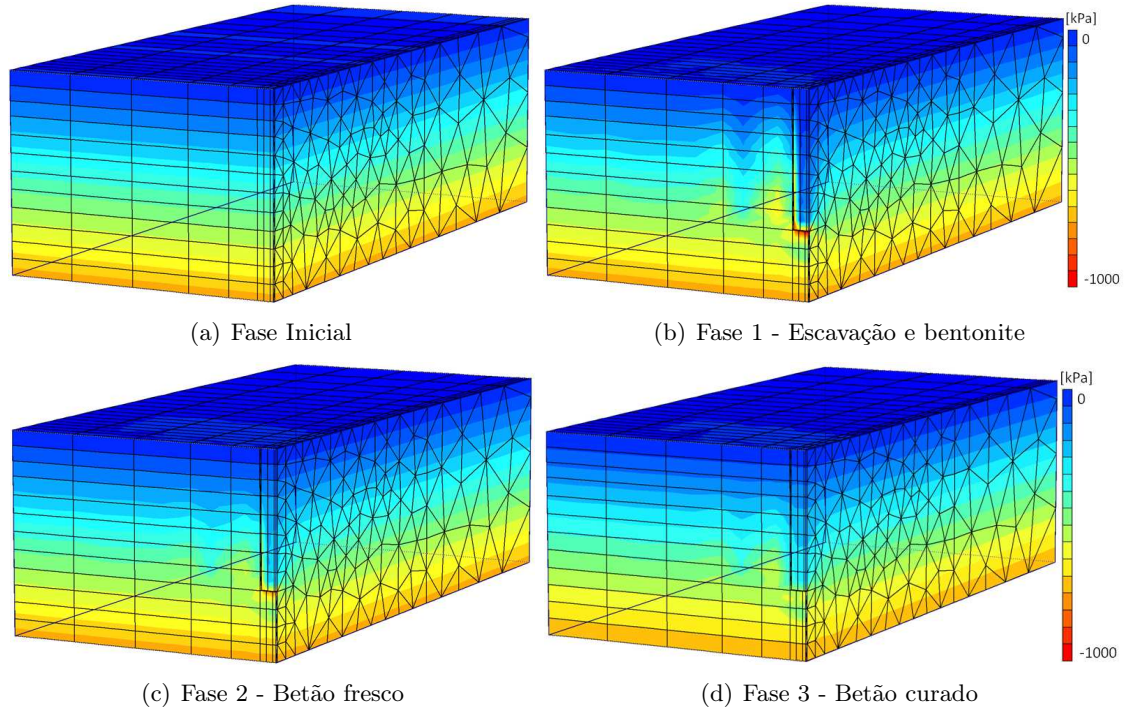


Figura 4.11: Desenvolvimento das tensões horizontais, σ_x , durante o processo construtivo da parede.

A passagem da Fase Inicial para a Fase 1 é aquela em que existe maior variação das tensões no maciço. A remoção do solo da vala e aplicação das tensões relativas à bentonite origina um alívio de tensões na vala bastante significativo e visível na Figura 4.11(b), σ_x . Essas tensões aliviadas são distribuídas para o solo situado na zona lateral e inferior da vala. O solo situado na zona inferior da vala é o que mais tensões recebe da descompressão do solo no tardo da parede e daí ser a zona que apresenta mais compressões nesta fase. Pela Figura 4.14 pode-se observar o comportamento das tensões σ_x e σ_z durante as várias fases.

Os eixos P e R são eixos auxiliares constituintes das faces frontal e lateral da vala, respectivamente e o eixo Q é o do canto do modelo, como se pode observar na Figura 4.15. A partir dos resultados dos elementos do solo pertencentes a este eixo é possível verificar o desenvolvimento das tensões durante o processo construtivo no solo situado abaixo da vala.

A Figura 4.14(a) apresenta as tensões σ_x para os eixos auxiliares P e Q. Pode-se observar que, no solo abaixo da vala (eixo Q) o aumento de tensões σ_x é bastante maior que no solo situado na face da vala, pelo que é possível perceber que a tensão aliviada da zona escavada tende a ser distribuída para a zona inferior da vala. No entanto, o processo de transferência verifica-se em ambas as zonas.

Da análise das tensões σ_z durante o processo, na Figura 4.14(b), pode-se verificar que, existe também uma distribuição das tensões no sentido vertical mas, a tensão máxima no solo abaixo da vala é um pouco menor que a verificada para as tensões horizontais σ_x .

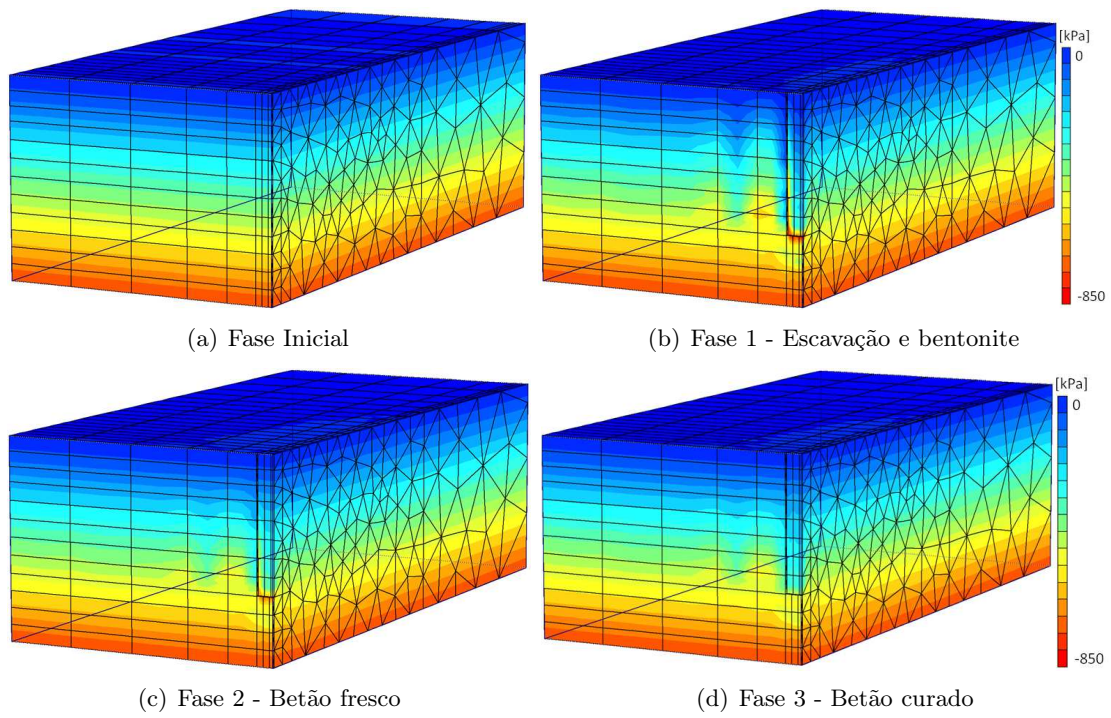


Figura 4.12: Desenvolvimento das tensões horizontais, σ_z , durante o processo construtivo da parede.

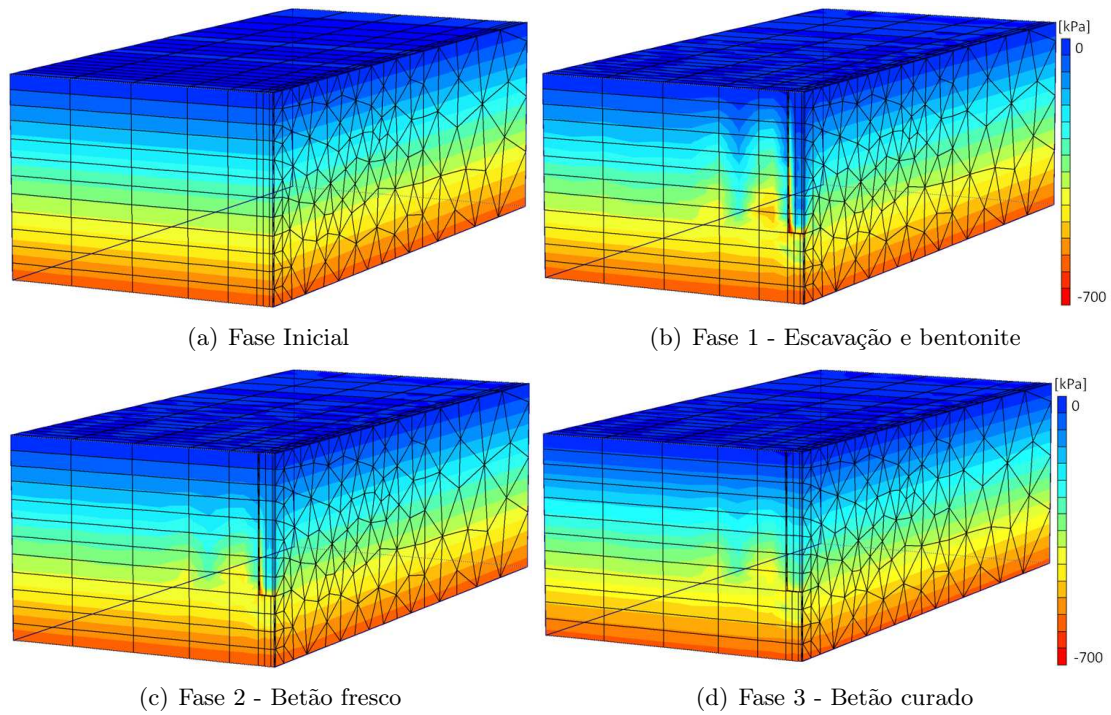
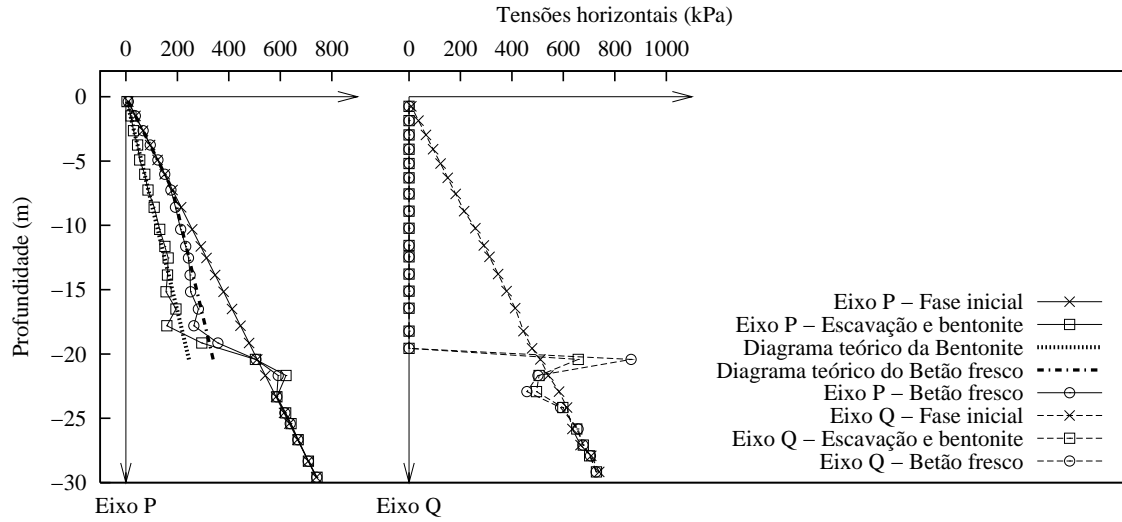
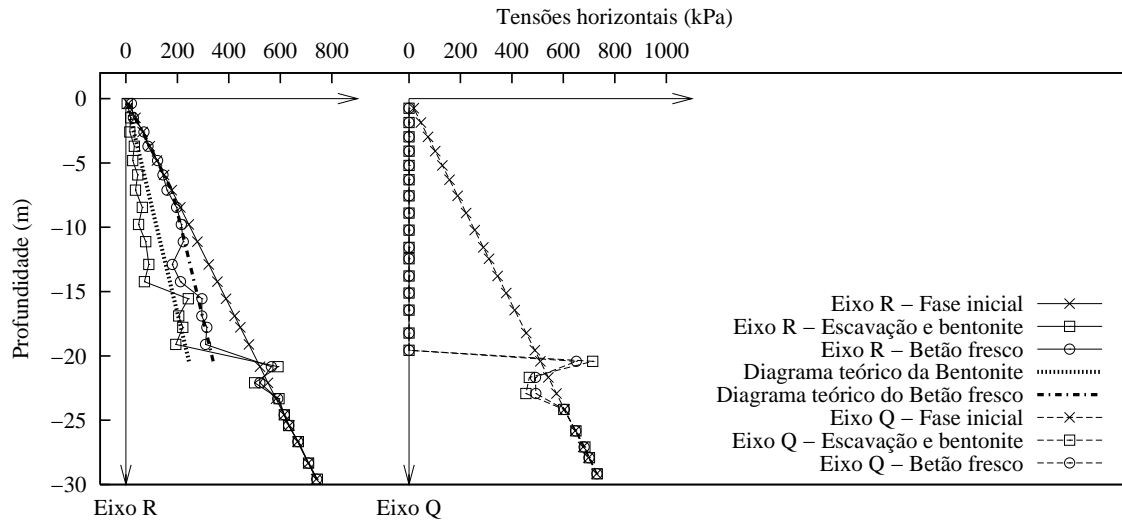


Figura 4.13: Desenvolvimento das tensões verticais, σ_y , durante o processo construtivo da parede.

(a) Tensões horizontais σ_x para as eixos R e Q.(b) Tensões horizontais σ_z para as eixos S e Q.Figura 4.14: Tensões horizontais σ_x e σ_z para as três fases de instalação da parede moldada.

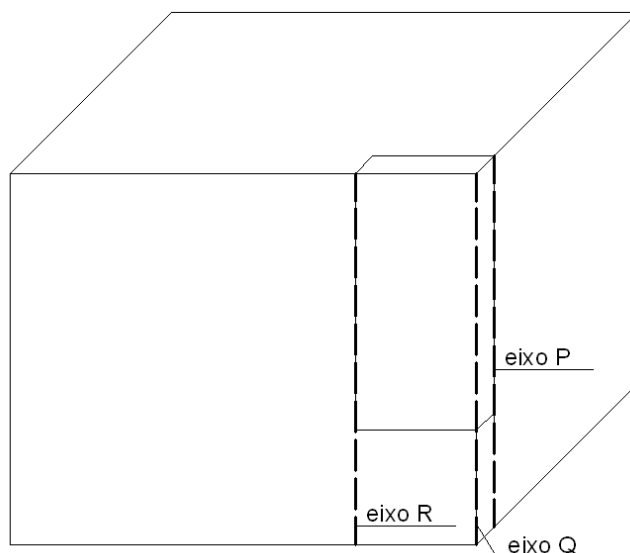


Figura 4.15: Identificação de três eixos auxiliares, para a análise das tensões horizontais para o modelo 3D com um painel.

Para o solo da face lateral da vala verifica-se que as tensões são dependentes do processo de instalação da parede (bentonite e betão fresco) assim como o verificado para as tensões σ_x .

Confirmando o observado anteriormente a Figura 4.12(b), na figura seguinte mostra que existe menor distribuição de tensões horizontais σ_z na face lateral da vala, assim como são menores as tensões no fundo de vala e no solo lateral a esta. As tensões verticais são por sua vez ainda mais baixas, no entanto, estas também sofrem do processo de transferência de carga. Prevê-se assim que, quando se efectua a escavação de um painel, com colocação de bentonite, as tensões instaladas no tardo de escavação serão distribuídas para o solo envolvente, com maior parcela para o solo abaixo do fundo da vala.

Estes fenómenos, denominados anteriormente como *mecanismos de transferência de carga*, dão-se nas duas direcções (horizontal e vertical), por possibilidade do modelo tridimensional, comparativamente ao modelo 2D, que apenas podia distribuir as tensões aliviadas na direcção vertical.

Quando se executa a Fase 2 um outro fenómeno se verifica, as tensões anteriormente desviadas são parcialmente redistribuídas para o solo das paredes da vala, aumentando ligeiramente as tensões nessa zona e aliviando, em parte, o solo no fundo da vala (Figura 4.11(c)).

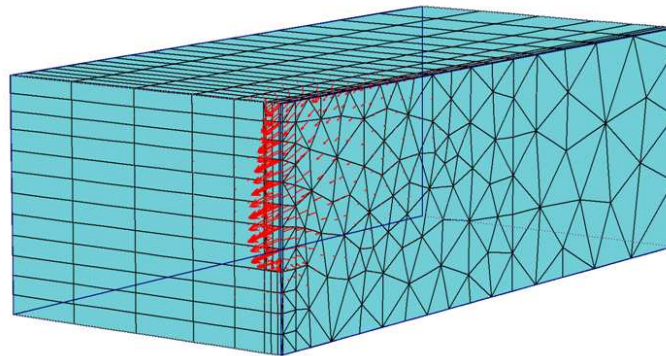
Com a instalação do painel betonado propriamente dito, o solo no seu tardo de não sofre grande alteração nas tensões aplicadas. Apenas o fundo de vala deixa de estar em elevada compressão, pois as suas tensões foram parcialmente redistribuídas para o solo do tardo de da parede. Assim, como mostra a Figura 4.11(d), os elementos do solo no tardo de da parede curada mantêm o nível de tensão instalado no seu tardo de.

Esta distribuição de tensões, dá-se para as três direcções, x , y e z , que como se

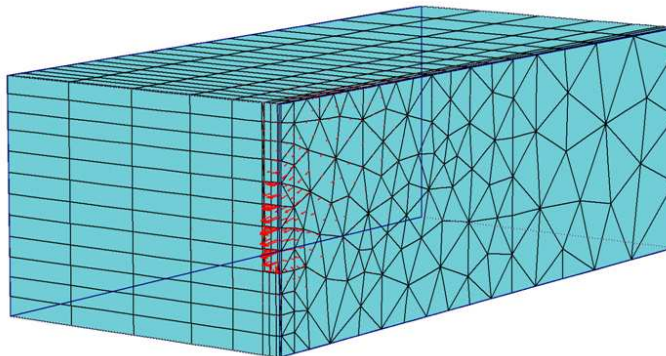
pode observar nas figuras, se desenvolvem da mesma forma, mas com valores diferentes. As maiores tensões desenvolvem-se na fase de betonagem para σ_x , no fundo de vala. Para as três direcções verifica-se que estes efeitos apenas se sentem até uma profundidade aproximada de L para traz da parede, sendo L a largura do painel instalado.

4.3.4 Resultados: análise dos deslocamentos horizontais e assentamentos do maciço

A Figura 4.16 apresenta os vectores do deslocamento total sofrido pelo solo durante a escavação e preenchimento da vala com bentonite (Fase 1) e betonagem do painel (Fase 2). O maciço sofre maiores deslocamentos na primeira fase. O solo desloca-se em sentido descendente para a abertura da vala escavada. Na segunda fase os vectores de deslocamento são menores, o que implica que houve um recuo do solo relativamente à primeira fase.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 4.16: Vectores dos deslocamentos do solo durante a construção da parede.

Para uma análise mais pormenorizada foram registados os deslocamentos nos planos identificados na Figura 4.17. Os Planos 1 a 6 são planos que estão contidos na zona escavada. Os Planos 7 a 17 são os planos do solo adjacente ao painel instalado. O Quadro 4.1 indica a distância destes planos ao Plano 1.

A Figura 4.18 mostra os resultados dos deslocamentos nestes planos para as Fases 1 e 2 da instalação da parede. A deformação em ambas as fases é maior para o plano

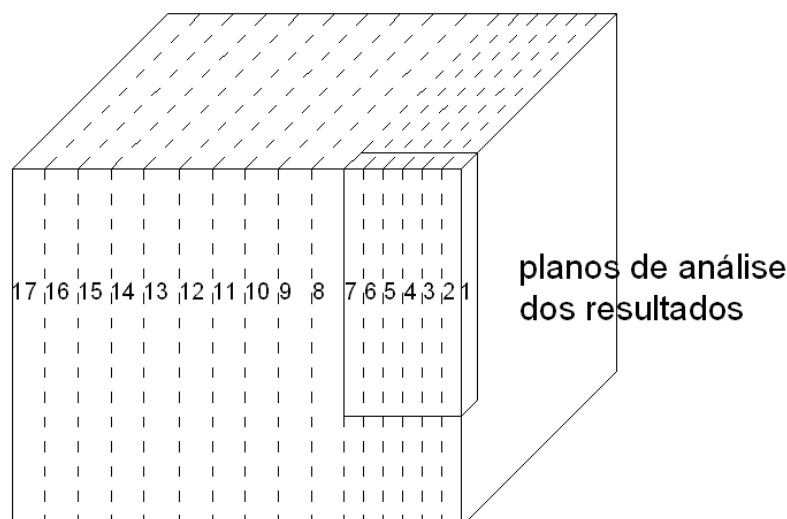
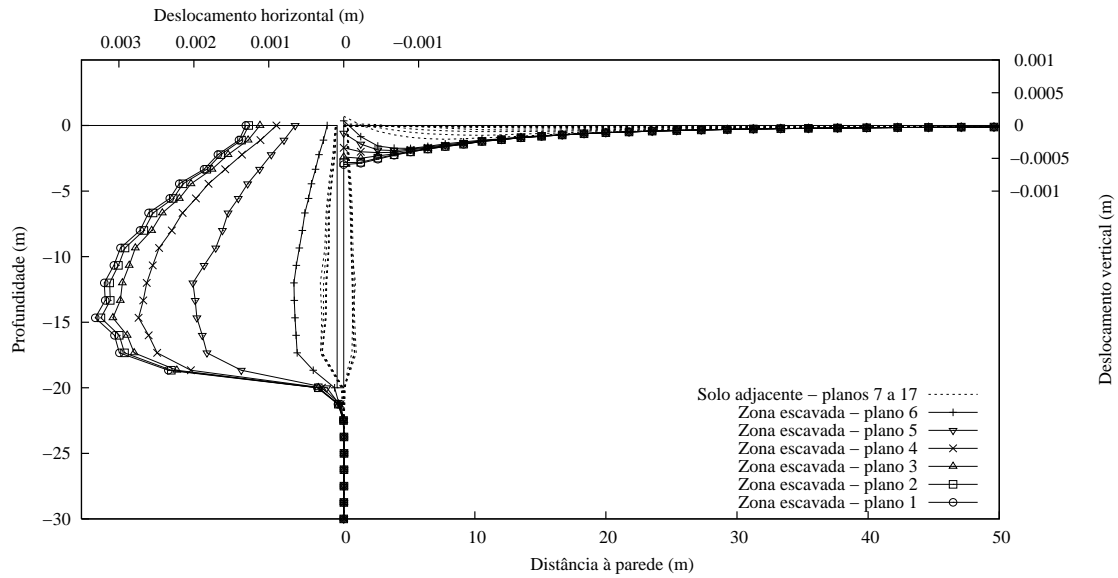


Figura 4.17: Identificação dos planos de análise dos resultados para o modelo 3D com um painel.

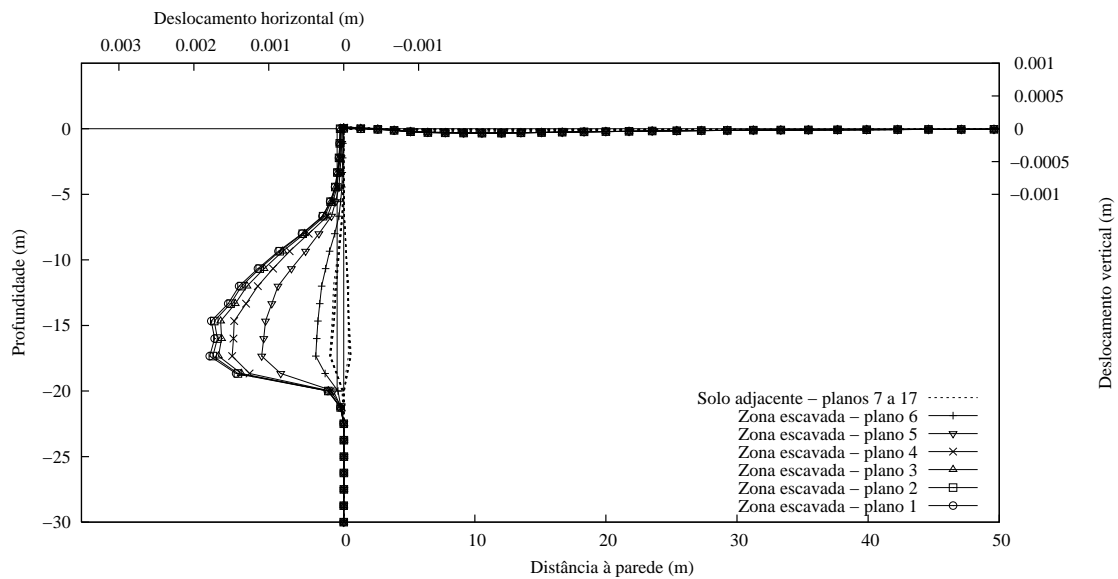
central do painel, diminuindo até aos seus bordos. No solo adjacente ao painel construído a deformação não é totalmente nula, existindo sempre uma pequena alteração do estado indeformado. Na primeira fase, os deslocamentos horizontais, dx , dão-se em toda a altura do painel, com maiores valores na zona inferior (Figura 4.18(a)), na segunda fase existe uma recuperação dos deslocamentos, principalmente no topo do painel, onde estes praticamente se anulam (4.18(b)). Os assentamentos na superfície também diminuem à medida que o plano do maciço se afasta do centro do painel, com pequenas deformações para o solo fora da zona escavada, durante a primeira fase. Na segunda fase toda a superfície do maciço recupera consideravelmente, mostrando deslocamentos praticamente nulos, tanto na zona do painel como no solo adjacente (Figura 4.18(b)).

Relativamente aos deslocamentos horizontais na direcção do eixo X observados na Figura 4.19, verifica-se que o deslocamento horizontal máximo (δ_{hmax}) é de 3,3 mm e dá-se na zona inferior da parede frontal da vala, durante a remoção do solo e colocação da bentonite (Figura 4.19(a)). Este deslocamento é originado pelo alívio de tensões e descompressão do solo na face frontal da vala. Na segunda fase o maior deslocamento horizontal é de 1,8 mm e situa-se na parte inferior da face da vala. Pela Figura 4.19(b) observa-se que, na Fase 2, a zona superior da face da vala recupera quase totalmente os deslocamentos sofridos na primeira fase, anulando-os. Os deslocamentos horizontais na superfície do terreno são pouco significativos na fase da escavação, passando a tomar valores nulos durante segunda fase.

A face lateral da vala, por sua vez, sofre deslocamentos horizontais na direcção do eixo Z , sendo o seu movimento concordante com os deslocamentos anteriores, para o interior da vala escavada. A primeira fase apresenta maiores deslocamentos, sendo o máximo de 1,0 mm (4.20(a)). Na segunda fase há uma significativa recuperação do solo, com um comportamento em tudo idêntico aos deslocamentos horizontais observados na direcção do eixo X (Figura 4.20(b)).



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

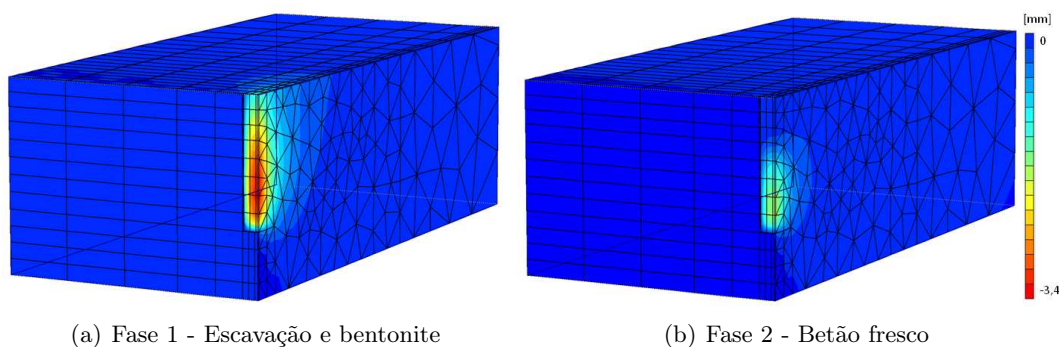


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 4.18: Deslocamentos horizontais, dx , no tardo da parede e assentamentos do solo na superfície do maciço, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.

Quadro 4.1: Distância dos planos de análise da Figura 4.17 ao Plano 1.

Plano	Distância ao plano 1 (m)
1	0,00
2	0,42
3	0,83
4	1,25
5	1,67
6	2,08
7	2,50
8	6,50
9	10,50
10	14,50
11	18,50
12	22,50
13	26,50
14	30,50
15	34,50
16	38,50
17	42,50

Figura 4.19: Deslocamentos horizontais, dx , direcção do eixo X , do solo durante a construção da parede, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.

Os assentamentos do maciço tomam valores muito mais baixos do que os deslocamentos analisados nos parágrafos anteriores. O assentamento máximo é de 0,61 mm na Fase 1 e de 0,006 mm na Fase 2, localizados na superfície do terreno, próximos da vala. No entanto, durante a primeira fase de construção da parede, os assentamentos dão-se não só à superfície do maciço mas também na parede frontal da vala escavada, com valores próximos do máximo. Enquanto que nos deslocamentos horizontais apenas se verificavam movimentos no sentido da vala, aqui verificam-se movimentos em ambos os sentidos, ascendente e descendente. Os primeiros dão-se no fundo da vala e podem chegar a valores na ordem de 0,9 mm, como ilustra a Figura 4.21.

Das figuras anteriores nota-se que os deslocamentos se dão apenas na proximidade do painel, pois em toda a zona restante, e mais afastada deste, todos deslocamentos tomam valores nulos ou praticamente nulos. Assim como se viu para as tensões na secção anterior,

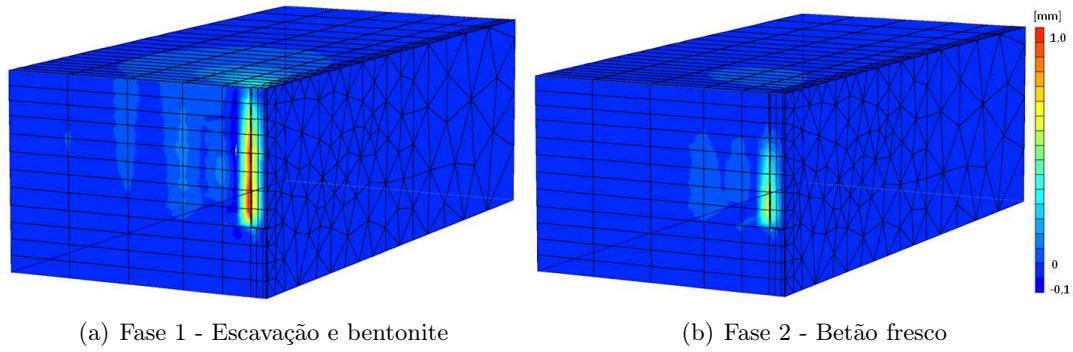


Figura 4.20: Deslocamentos horizontais, dz , direcção do eixo Z , do solo durante a construção da parede, na zona do solo escavado e na zona adjacente a este.

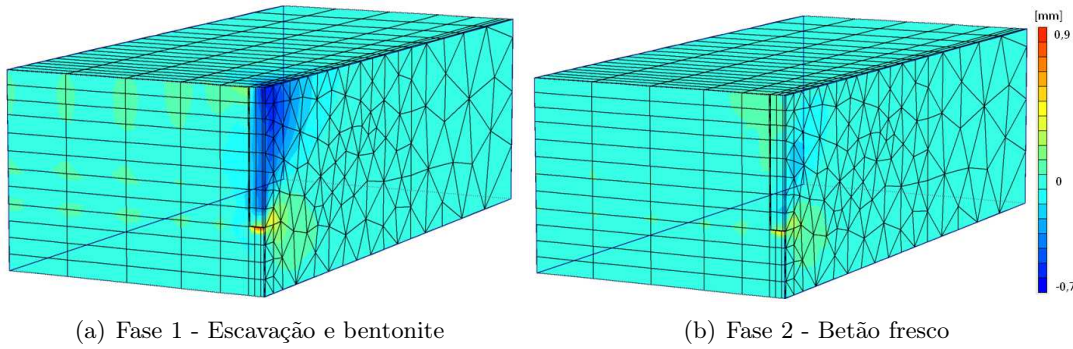


Figura 4.21: Deslocamentos verticais, dy , na direcção do eixo Y , do solo durante a construção da parede.

apenas o solo mais próximo da parede sofre com a sua instalação.

4.3.5 Análise comparativa

Sendo esta a primeira modelação tridimensional que realmente tenta representar a situação idêntica da obra, justifica-se a sua comparação com o modelo bidimensional modelado anteriormente. A Figura 4.22 compara os deslocamentos horizontais dx e os assentamentos à superfície do terreno (dy), entre o modelo tridimensional com uma parede com 5 m de largura e o modelo 2D do capítulo anterior. Os deslocamentos e assentamentos apresentados do último modelo foram retirados do plano central do painel, visível nas Figuras 4.21 e anteriores (plano mais à direita do modelo).

A partir da análise do gráfico da Figura 4.22 conclui-se que o último modelo apresenta resultados muito diferentes dos obtidos anteriormente. O último modelo 3D apresenta valores de deslocamento do solo até cinco vezes menores que os anteriores, tanto na fase de escavação da vala como na fase de betonagem. No entanto, a forma da deformada do solo é idêntica em ambas as fases, com os maiores deslocamentos (dx e dy) durante a fase de escavação, mas em pontos diferentes da face da vala. No modelo 2D o δ_{hmax} situa-se a $2/3$ de h , aproximadamente, enquanto que no modelo 3D, com 5 m de largura de parede, o δ_{hmax} dá-se a $1/3$ de h , sendo estas alturas medidas da base para o topo da parede e sendo h a

altura da mesma. O assentamento máximo à superfície do terreno verifica-se também para a 1ª fase, e neste caso, o δ_{vmax} , em ambos os modelos, verifica-se no ponto mais próximo da parede.

Durante a fase de betonagem da vala verifica-se um recuo dos deslocamentos face à fase anterior, com maior significado no modelo 2D do que no modelo 3D.

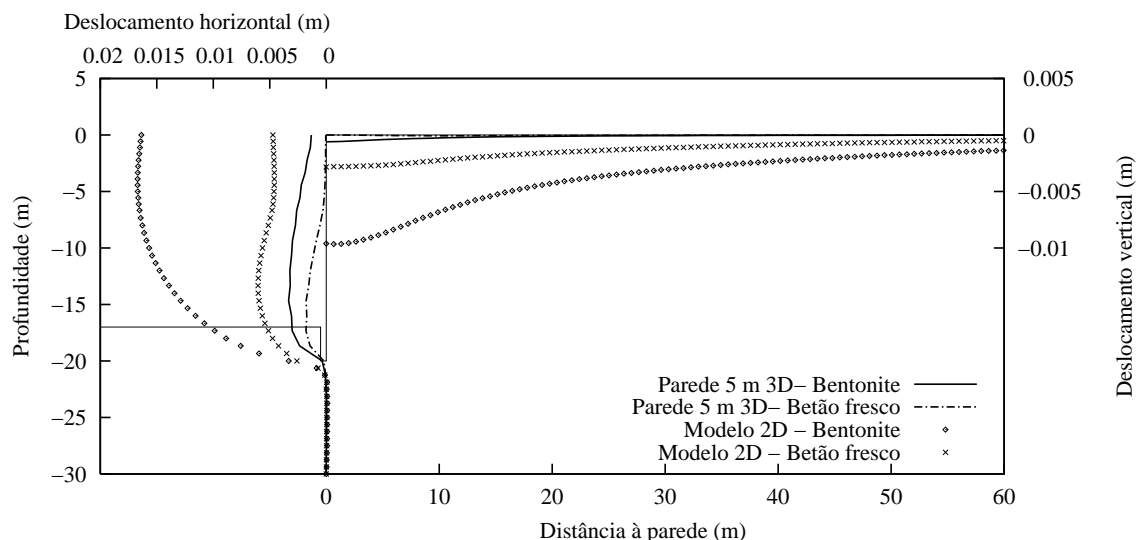


Figura 4.22: Comparação dos deslocamentos horizontais e assentamentos entre o modelo 3D com 5 m de largura e o modelo 2D calculado no Capítulo 3, para as fases de instalação da parede.

A diferença dos resultados entre o modelo 2D e o modelo 3D mostra, por um lado, a importância dos efeitos tridimensionais e, por outro faz prever que o estudo tridimensional do problema pode melhorar significativamente a previsão dos deslocamentos e assentamentos do maciço durante a construção de uma parede moldada.

4.4 Aplicação do modelo *WIM* a um caso de uma parede moldada constituída por 8 painéis com 5 m de comprimento

4.4.1 Considerações iniciais

Com base no caso estudado na secção anterior, procede-se ao estudo da instalação de uma parede moldada com 40 m de largura, constituída por 8 painéis de 5 m construídos consecutivamente.

O modelo de elementos finitos está representado na Figura 4.23 e tem de dimensões $90 \times 120 \times 30 \text{ m}^3$ (comprimento, largura e altura, respectivamente). A parede em si tem 20 m de altura e 0,8 m de espessura. Por simetria, o modelo considera metade dessa espessura.

Os materiais utilizados neste modelo são os definidos no Quadro 3.2 do Capítulo 3. O processo de construção da parede é o mesmo abordado na secção 3.3.3, que se desenvolve

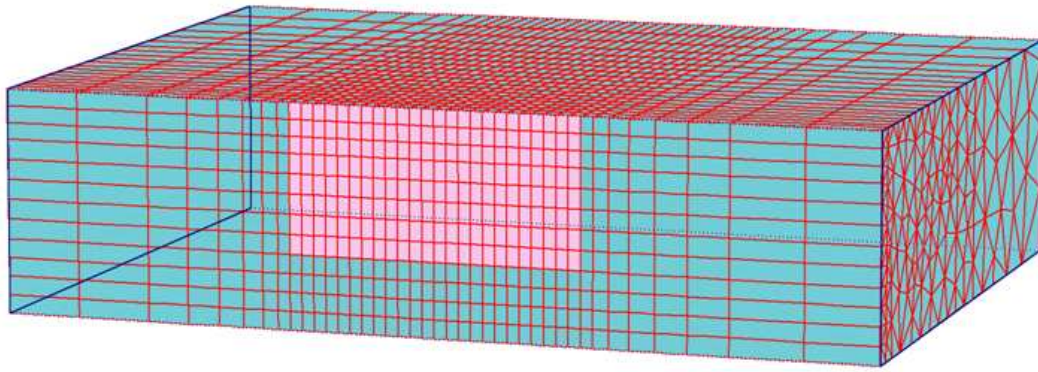


Figura 4.23: Malha de elementos finitos para a modelação de uma parede moldada com 40 m de largura, constituída por 8 painéis.

em 3 fases para cada painel, repetindo-se consecutivamente para os 8 painéis constituintes desta parede moldada e resultando num total de 24 fases de construção. Os 8 painéis são construídos consecutivamente pela ordem ilustrada na Figura 4.24.

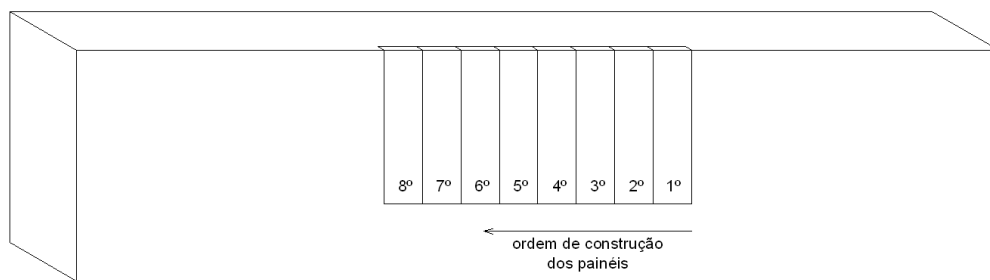


Figura 4.24: Ordem de instalação dos painéis da parede moldada.

4.4.2 Resultados: alteração do estado de tensão no maciço durante a instalação da parede

A evolução das tensões σ_x durante o processo de instalação da parede moldada é ilustrada na Figura 4.25. Estas tensões têm a direcção perpendicular à face frontal da parede e variam entre 0 e -1200 kPa , durante o processo de instalação.

Na 1ª fase de instalação do 1º painel, a Figura 4.25(b) mostra que as tensões σ_x na face frontal da vala são reduzidas por acção da escavação e da aplicação da bentonite. essas tensões são distribuídas para o solo adjacente à escavação. Os bordos da vala e o fundo da mesma sofrem um aumento das tensões nesta direcção, principalmente na zona mais profunda da vala.

Em comparação com os fenómenos registados no modelo anterior (Figuras 4.11, 4.12 e 4.13) a transferência das tensões dá-se para uma zona mais próxima da vala, sem grande perturbação do solo mais afastado. Logo, considerando um modelo completo com vários

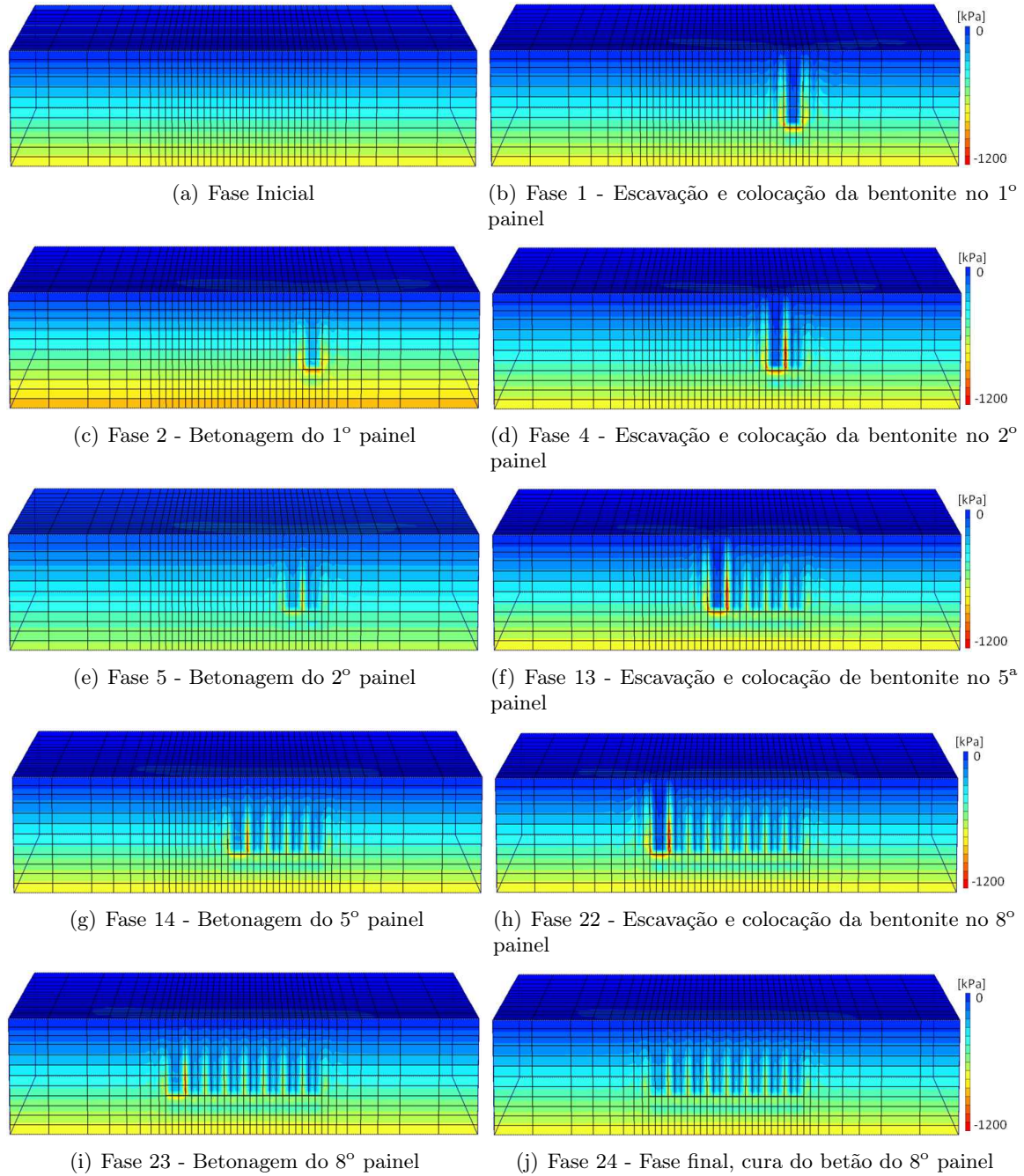


Figura 4.25: Desenvolvimento das tensões horizontais no maciço, σ_x , durante o processo construtivo da parede moldada.

painéis, verifica-se uma menor perturbação do solo adjacente do que considerando um modelo com apenas um painel de parede moldada. Esta diferença deve-se ao facto de a malha do solo adjacente ao painel ser muito menos refinada para o modelo anteriormente analisado do que para o modelo presente, e daí se verificarem perturbações no solo em zonas mais afastadas, devido às transferências de carga.

Na 2ª fase, quando se betona o 1º painel (Figura 4.25(c)), verifica-se que o solo no tardo da parede apresenta tensões σ_x superiores do que as da fase de bentonite, e que os bordos e o fundo da vala têm menos compressão. Então, pode-se afirmar que as tensões foram parcialmente redistribuídas dos bordos para o tardo da parede, durante esta fase.

Na construção do 2º painel, Figura 4.25(d), verifica-se que, na fase de escavação da 2ª vala o processo de transferência de tensões do solo, do tardo para os bordos e fundo da vala repete-se, mas desta vez com maior intensidade. Ou seja, as tensões de compressão na zona adjacente à vala são maiores para o 2º painel do que para o 1º, e abrangem maior altura, principalmente no bordo lateral que faz fronteira com o 1º painel instalado (Figura 4.25(d)).

De seguida, durante a betonagem do 2º painel, a Figura 4.25(e) mostra que as tensões instaladas nesta fase são menores que as instaladas na fase homóloga do 1º painel. Ou seja, assim como o nível de compressão é superior, também a redistribuição de tensões é maior, originando níveis de tensão σ_x mais baixos, na fase de betonagem do 2º painel.

A evolução de σ_x , durante a construção dos painéis seguintes, dá-se de forma muito idêntica à da instalação do 2º painel, tanto na fase de escavação da vala com colocação de bentonite, como na fase de betonagem do painel.

A última fase da construção da parede, Figura 4.25(j), mostra um maciço alterado pelo processo de instalação, com tensões mais baixas nas zonas dos painéis e no solo abaixo destes. E, nos bordos verticais e fronteiras entre os painéis, as tensões são de compressão média. Não se verificam tensões altas de compressão no maciço, nesta última fase.

As tensões σ_z , são tensões que se desenvolvem na direcção perpendicular às faces laterais da vala. A sua evolução ao longo do processo construtivo da parede é ilustrado na Figura 4.26. Os seus valores podem variar entre 2000 *kPa* de tracção (ou descompressão) e -1000 *kPa* de compressão.

Durante a instalação do 1º painel, Figuras 4.26(b) e 4.26(c), há pouca alteração do estado de tensão, σ_z , no maciço. Na 1ª fase dá-se um pequeno alívio das tensões nas paredes laterais da vala e no centro da parede frontal da mesma. O fundo da vala sofre uma compressão razoável, na ordem de -1000 *kPa*. A superfície do maciço apresenta uma ligeira alteração, mostrando um pequeno bolbo de solo que sofre alívio de tensões nesta direcção. O que não se verificava na análise de tensões σ_x , onde a superfície do terreno se mostrou inalterada, durante a instalação da parede.

Na 2ª fase de instalação do 1º painel, Figura 4.26(c), verifica-se apenas um ligeiro aumento das compressões do solo, comparativamente à fase anterior. Observa-se também que a área comprimida, na superfície do terreno, é maior nesta fase.

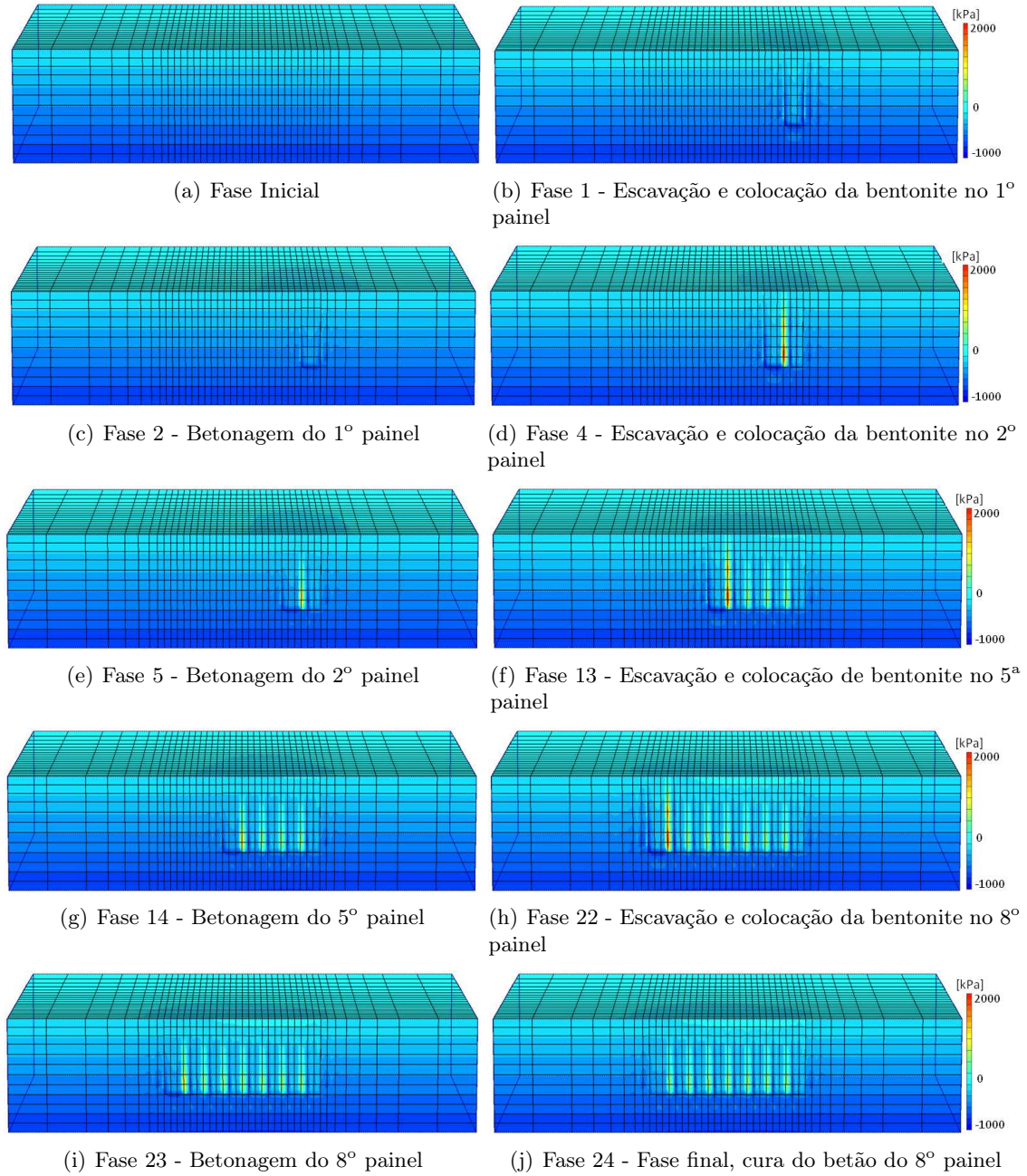


Figura 4.26: Desenvolvimento das tensões horizontais no maciço, σ_z , durante o processo construtivo da parede moldada.

Quando se escava a 2ª vala, para instalar o 2º painel, o comportamento do solo altera-se face ao registado para o 1º painel. O alívio de tensões σ_z é maior, originando a descompressão do solo da face lateral da vala que faz fronteira com o 1º painel. As tensões nesta zona, para esta fase, atingem 2000 *kPa* (Figura 4.26(d)). Na fase de betonagem do 2º painel, a Figura 4.26(e) mostra que a face lateral da vala tem agora compressões na zona mais alta e menores tracções na zona mais baixa, o que indica que as tensões σ_z , durante esta fase, aumentaram na face lateral da vala.

O comportamento do maciço, durante a instalação dos painéis seguintes, é idêntico ao registado para o 2º painel. Verifica-se na última fase construtiva, Figura 4.26(j), que o maciço apresenta tensões σ_z de compressão em todo o seu desenvolvimento, com excepção às fronteiras entre os painéis, que apresentam descompressões na ordem de 1000 *kPa*. Os bordos extremos da parede moldada não apresentam alteração significativa deste estado de tensão. Já a superfície do maciço mostra uma área de compressão, próxima da parede, que aumentou durante a instalação da mesma.

Face ao verificado na análise do modelo anterior, na Figura 4.12, a presente modelação regista maiores níveis de compressão do maciço em profundidade e níveis de descompressão, na parede lateral da vala, que não existiam na modelação anterior, pelo facto de se instalar apenas um painel.

As tensões verticais σ_y desenvolvem-se perpendicularmente ao plano da superfície do terreno e tomam valores entre -1000 *kPa* e 50 *kPa*, durante a instalação da parede moldada.

Ao iniciar o processo construtivo, com a instalação do 1º painel (Figura 4.27(b)), verifica-se que, no campo das tensões σ_y , o solo da face frontal da vala sofre uma ligeira descompressão, e as tensões são desviadas para o solo lateral à vala. Dá-se o fenómeno de transferência de carga idêntico ao verificado para o campo de tensões horizontais σ_x , assim como na fase de betonagem do 1º painel (Figura 4.27(c)), em que se redistribuem parte das tensões para o solo da zona escavada. No entanto, quando se executa o 2º painel, verifica-se que, para além da semelhante descompressão do solo da face frontal da vala, dá-se uma considerável descompressão da parede lateral da vala que faz fronteira com o 1º painel instalado. Na 2ª fase regista-se também uma redistribuição de tensões, no entanto a parede lateral da vala mantém tensões de descompressão superiores aos do solo adjacente.

Com o evoluir do processo construtivo verifica-se que o estado de tensão σ_y do maciço varia com a ordem de construção dos painéis. A Figura 4.27(j) mostra que o solo no final da construção encontra-se com maiores descompressões nos últimos painéis instalados, principalmente nas zonas mais próximas da superfície do terreno. O solo situado junto ao pé da parede mantém um certo nível de compressão no final da construção.

Em comparação com os resultados obtidos na modelação anterior (Figura 4.13), existe mais compressão no maciço, e, à semelhança do verificado para o campo das tensões σ_z também a face lateral da parede sofre maiores descompressões neste modelo, a partir da instalação do 2º painel.

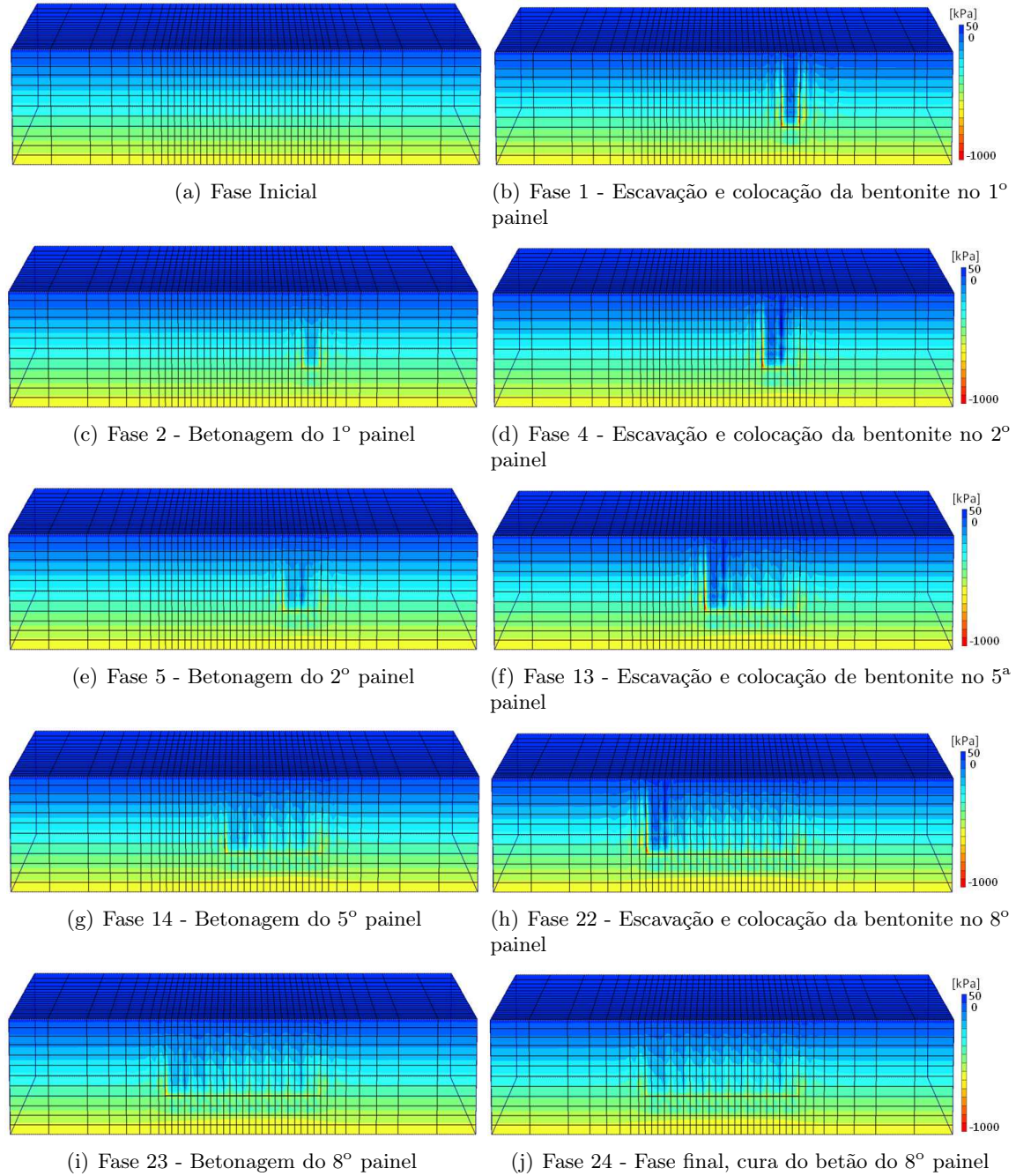


Figura 4.27: Desenvolvimento das tensões verticais no maciço, σ_y , durante o processo construtivo da parede moldada.

Deste estudo verifica-se também que, a instalação do 1º painel é a menos desfavorável de todas, com registo de menor alívio de tensões assim como menor redistribuição das mesmas. A partir da instalação do 2º painel a situação é mais desfavorável, com tendência a aumentar ligeiramente até ao final da construção.

4.4.3 Resultados: análise dos deslocamentos do maciço

O deslocamento horizontal, na direcção do eixo X , da face frontal da vala é a consequência da descompressão do solo quando este é escavado e lhe são aplicadas as pressões correspondentes à lama bentonítica. O seu valor máximo dá-se durante a 1ª fase de execução, seja qual for o painel que se esteja a construir. Durante a fase de betonagem a recuperação do solo face às pressões aplicadas (devido ao betão fresco) leva a alguma recuperação de deslocamentos.

A Figura 4.28 apresenta quatro fases do processo construtivo ilustrando a evolução dos deslocamentos horizontais dx . É visível que, no plano frontal do modelo, apenas a zona constituinte do painel executado é afectada por este processo, pois o solo do restante maciço, neste plano, tem os deslocamentos impedidos na direcção do x , pelas condições impostas de fronteira (apoios). No entanto, no plano da superfície do terreno, à medida a que se avança na instalação dos oito painéis, aumentam os deslocamentos, como consequência da ordem de execução dos painéis.

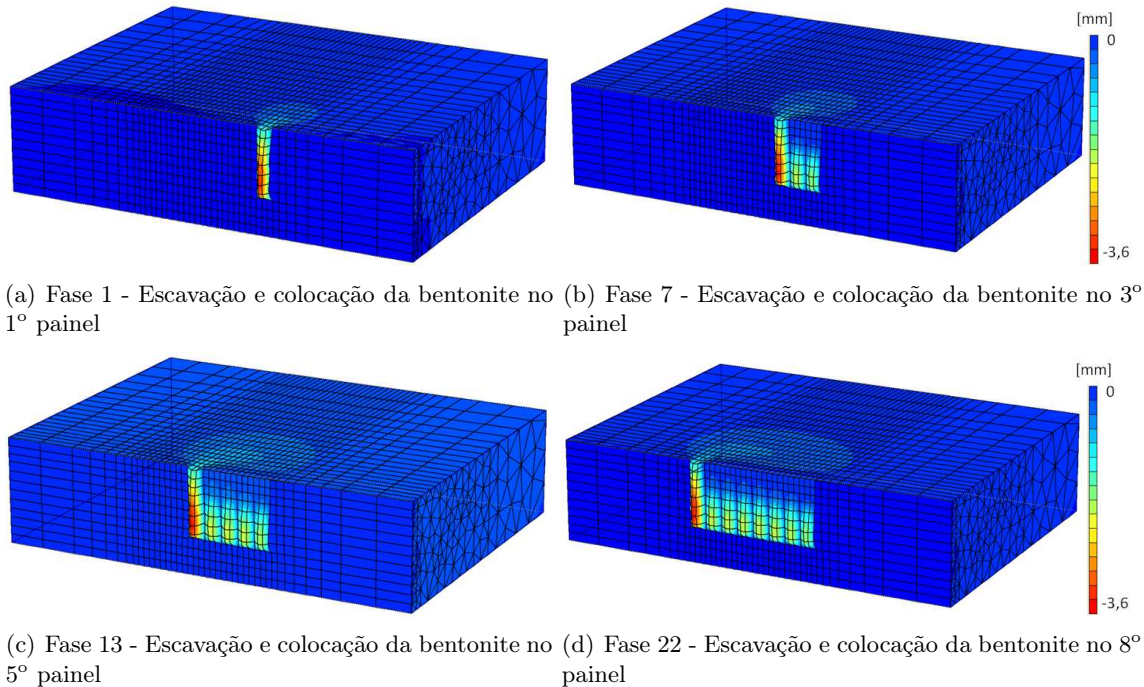


Figura 4.28: Desenvolvimento dos deslocamentos horizontais dx da vala frontal, durante o processo construtivo da parede moldada.

A deformada (dx) que se verifica durante a instalação do 1º painel é a menor, na fase de escavação, comparativamente aos painéis seguintes na mesma fase, em que este deslocamento

aumenta tendencialmente para o valor máximo de 3,6 mm, como se pode observar na Figura 4.29. Durante a betonagem o comportamento dos vários painéis é idêntico, tendendo para um deslocamento máximo dx de 2,1 mm nos últimos painéis betonados. A recuperação de dx da 1ª para a 2ª fase está na ordem dos 45%.

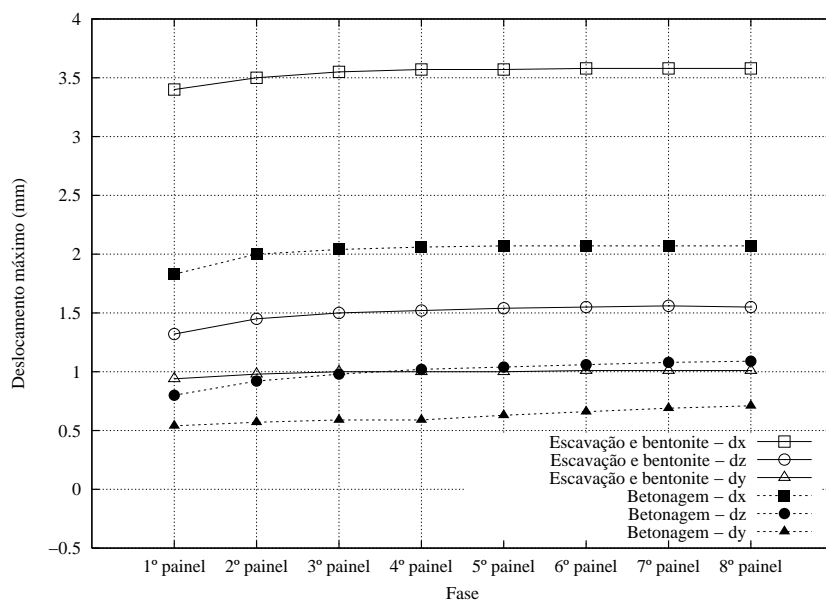


Figura 4.29: Deslocamentos máximos nas três direcções (X , Y e Z), para as várias fases de execução dos painéis.

Por análise visual da Figura 4.28(d) verifica-se que, após a betonagem dos painéis, os deslocamentos residuais do maciço são menores nos primeiros painéis executados, aumentando ligeiramente para os últimos painéis. Assim como os deslocamentos dx à superfície do terreno, após a execução de cada painel tendem a reduzir significativamente o seu valor.

Para obter maior detalhe dos resultados dos deslocamentos registaram-se leituras nos planos centrais dos painéis para algumas fases de construção. A Figura 4.30 ilustra a localização dos planos analisados.

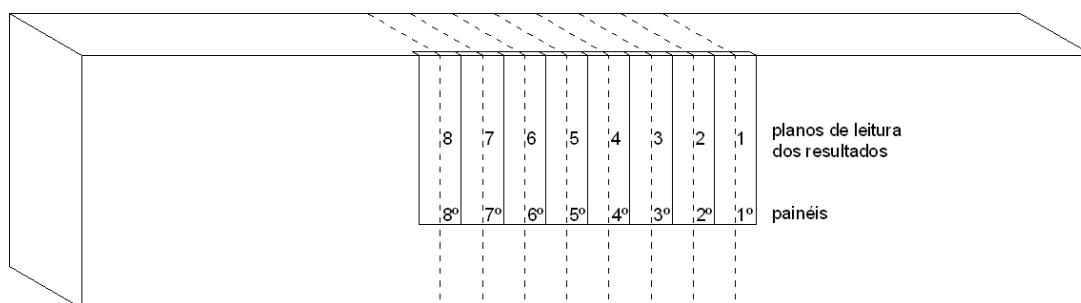


Figura 4.30: Identificação dos planos de leitura para o modelo 3D com 8 painéis de 5 m.

A Figura 4.31 apresenta os deslocamentos dx e dy no plano central de cada painel

(ilustrado na Figura 4.30) durante a sua instalação.

Quando é escavada a vala do 1º painel, os deslocamentos horizontais dx dão-se, maioritariamente, na zona da face frontal da vala, atingindo um δ_{hmax} a 1/3 da altura da vala, aproximadamente. Estes deslocamentos são maiores no plano central da vala e diminuem até aos seus bordos laterais (Figura 4.28(a)). Os solo adjacente a este 1º painel sofre pouco com o efeito da sua instalação. Apenas à superfície do terreno se verifica a propagação dos assentamentos para a zona adjacente à vala escavada.

Ao executar-se um 2º painel, verifica-se que o tipo de deformação é idêntica à obtida no 1º. A Figura 4.31(b) ilustra a deformação dx e dy para o centro dos painéis quando se escava a 2ª vala. Pode-se observar que, o 1º painel tem a deformada originada pela sua betonagem.

A zona inferior do painel tem uma concavidade virada para o interior do maciço, e o seu topo tem deslocamentos dx praticamente nulos. A superfície do terreno apresenta assentamentos até 30 m de distância da parede, com uma ondulação junto ao topo da mesma. Também nesta fase os deslocamentos (dx e dy) são maiores no centro do painel, diminuindo até às extremidades laterais.

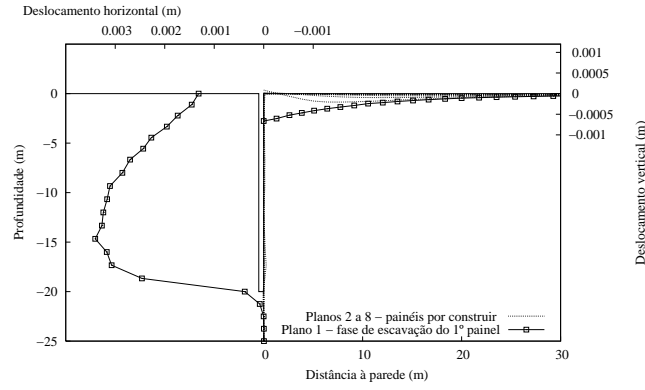
Durante o restante processo construtivo o esquema de deformação repete-se, e segundo o que a Figura 4.31(d) mostra, no final da construção da parede, o solo no tardo dos painéis fica com a deformação imposta pela sua betonagem, enquanto que a superfície do terreno apresenta a deformação resultante do efeito de instalação dos painéis adjacentes.

Em termos de avaliação quantitativa é possível concluir que a deformação final do 1º painel instalado é menor que a deformação final dos restantes painéis, que apresentam resultados praticamente coincidentes. Este resultado deve-se ao nível das tensões libertadas, a partir do 2º painel, serão superiores que às libertadas na instalação do 1º, como foi analisado na secção anterior (4.4.2).

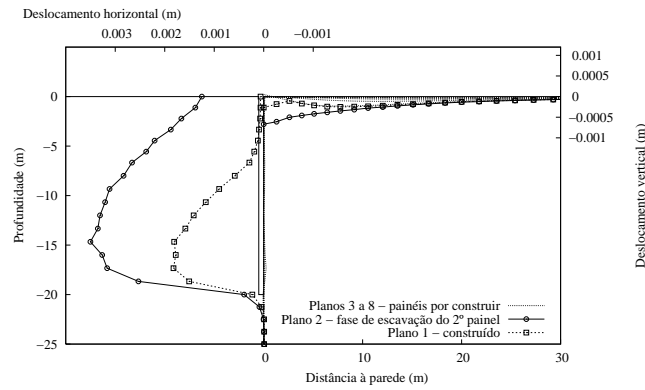
Os deslocamentos horizontais na direcção do eixo Z , dz , dão-se principalmente nas paredes laterais da vala escavada. Os seus valores são simétricos em relação ao eixo vertical da vala, pois ambas as paredes se movem para o interior desta, deslocando-se em sentidos contrários.

À medida que se vão executando os vários painéis os deslocamentos dz vão-se acumulando a partir dos cantos da vala e o volume de solo mobilizado aumenta na zona circundante a estes, com a particularidade de que enquanto os deslocamentos da parede lateral esquerda influenciam mais a zona inferior do maciço, a zona da parede lateral direita tendem a influenciar mais a zona superior do maciço, no final da construção (Figura 4.32(d)).

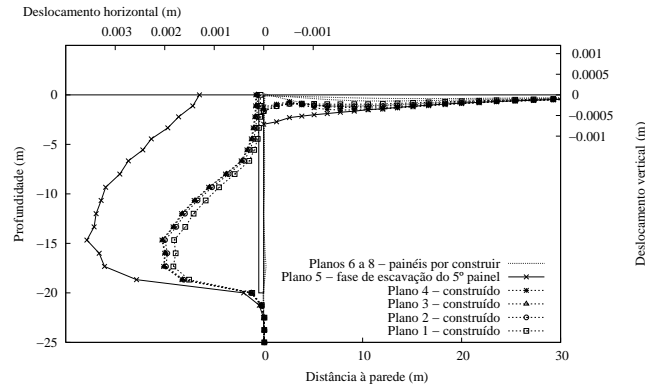
Embora os valores máximos sejam praticamente iguais para ambos os sentidos, o volume de solo mobilizado a deslocar-se do lado direito é maior. Este fenómeno deve-se ao sentido em que é executada a parede moldada, pois os painéis são instalados consecutivamente da directa para a esquerda do modelo, como ilustra a Figura 4.24. A Figura 4.32 apresenta a evolução de dz durante o processo construtivo da parede moldada. O valor



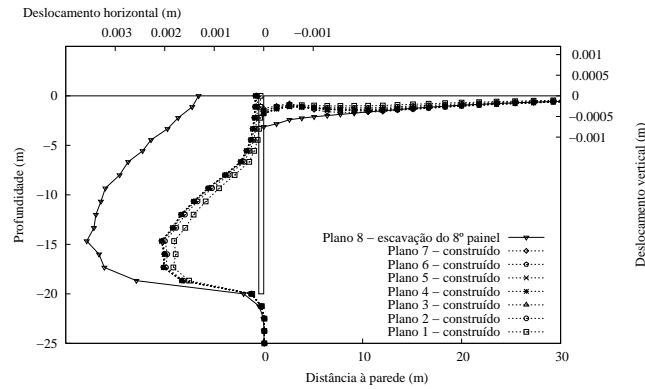
(a) Fase 1 - Escavação e colocação da bentonite no 1º painel



(b) Fase 4 - Escavação e colocação da bentonite no 2º painel



(c) Fase 13 - Escavação e colocação da bentonite no 5º painel



(d) Fase 22 - Escavação e colocação da bentonite no 8º painel

Figura 4.31: Deslocamentos horizontais e verticais (dx e dy) em cada painel durante a escavação de um deles.

máximo deste deslocamento é de 1,6 mm durante a escavação do 7º painel, e de 1,1 mm da fase de betonagem, dando-se este na recta de intercepção do plano frontal do maciço com a parede lateral da vala.

Embora os deslocamentos dz sejam inferiores aos verificados anteriormente (dx), quando se dá a fase de betonagem (2ª Fase) a sua redução é inferior não ultrapassando 35%. A Figura 4.29 mostra como é visível a diferença entre as duas fases para os dois tipos de deslocamentos horizontais dx e dz . É de notar também que, assim como em dx , os deslocamentos dz também aumentam a seguir à construção do 2º painel, tendendo para um valor fixo no final da construção da parede.

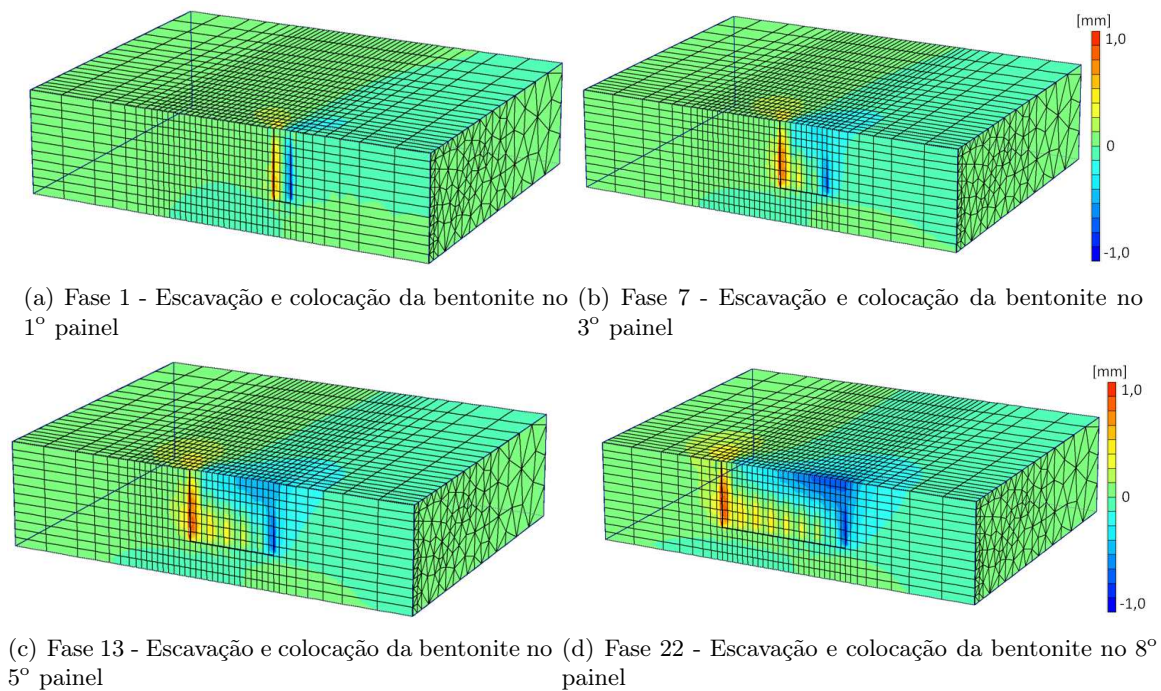


Figura 4.32: Desenvolvimento dos deslocamentos horizontais das valas laterais, durante o processo construtivo da parede moldada.

A Figura 4.34 mostra os deslocamentos dz na aresta direita da vala (plano frontal do modelo) e os deslocamentos dy à superfície do terreno, no mesmo plano, identificado na Figura 4.33, durante a execução da escavação dos 8 painéis.

A aresta em estudo é pertencente à face lateral da 1ª vala escavada, pelo que, segundo a Figura 4.34, sofrerá maiores deslocamentos dz nesta 1ª fase, pois, ao se remover o solo da vala, a sua face irá descomprimir, resultando numa deformação para o interior da vala, com uma concavidade pronunciada para dentro do maciço e com um pequeno deslocamento no topo da parede. Os deslocamentos verticais (dy), nesta fase, à superfície, não são tão significativos.

Quando se betona este painel a parede lateral da vala recua, diminuindo em parte os deslocamentos resultantes da 1ª fase. A partir desta fase, a face lateral da vala e a superfície do terreno vão aumentando ligeiramente a sua deformação, à medida que se constrói mais

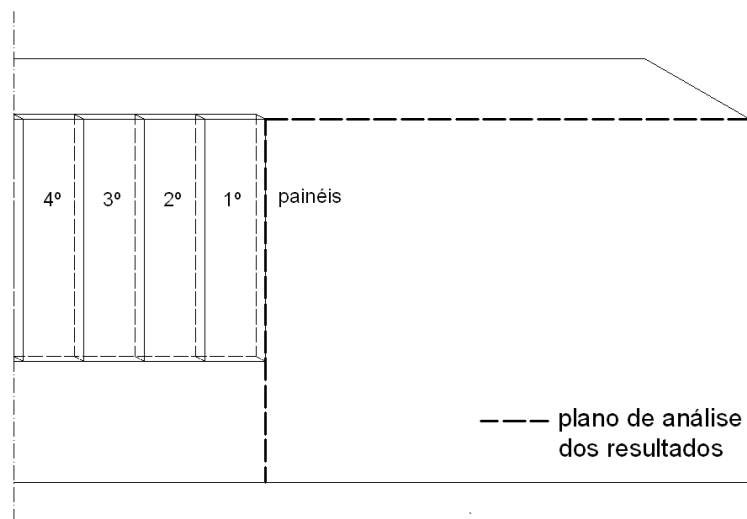


Figura 4.33: Identificação do plano de análise dos resultados da Figura 4.34 para o modelo 3D com 8 painéis.

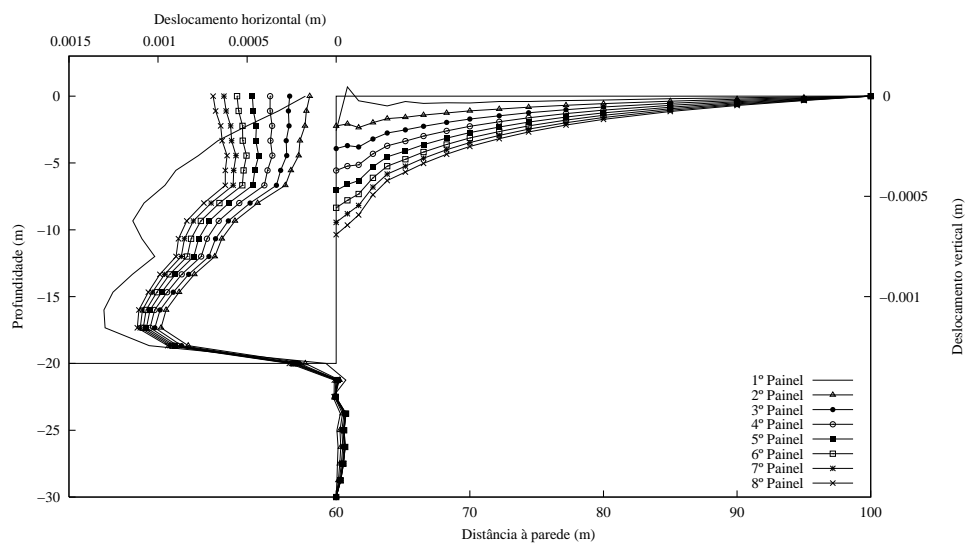


Figura 4.34: Deslocamentos horizontais, dz , na parede lateral da vala e deslocamentos verticais na superfície do maciço (no mesmo plano), durante a escavação dos 8 painéis.

um painel da parede moldada, com a mesma deformada obtida desde a betonagem do 1º painel.

Estes deslocamentos tomam valores significativos nos dois sentidos. Quando o deslocamento vertical se dá no sentido ascendente toma o nome de *empolamento*, e quando se dá no sentido descendente denomina-se de *assentamento*. Os empolamentos são localizados principalmente no fundo da vala, mas a sua evolução não é objecto de análise neste trabalho.

Quanto aos assentamentos, a sua análise é bastante importante para a compreensão do comportamento do maciço face ao processo de construção da parede moldada. A partir da observação da Figura 4.35 é possível analisar a evolução dos assentamentos do maciço durante este processo.

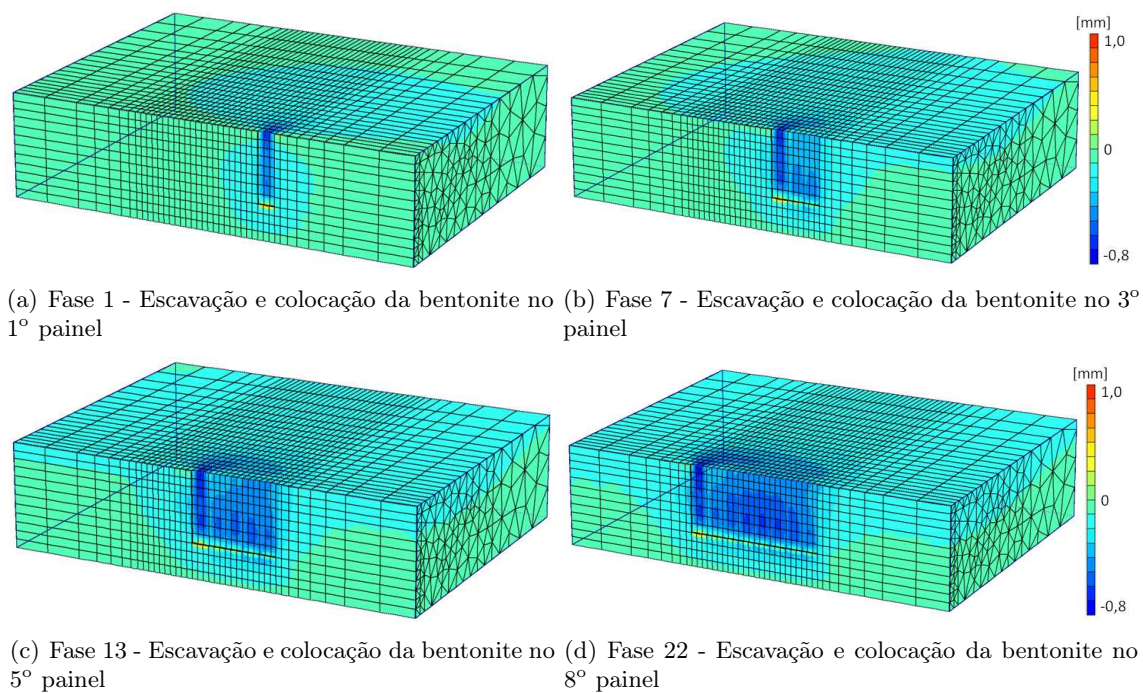


Figura 4.35: Desenvolvimento dos deslocamentos verticais, durante o processo construtivo da parede moldada.

Durante a escavação da vala para o 1º painel (Figura 4.35(a)) verifica-se que todo o solo da face da vala sofre um significativo assentamento. Com a betonagem este retrai-se ligeiramente, deixando alguma deformação residual. Durante o processo de instalação dos restantes painéis observa-se que os painéis centrais são os que menos recuperam depois da betonagem, originando à superfície do maciço uma deformação mais pronunciada.

O assentamento à superfície evolui com a construção da parede, na medida que, mesmo que por valores muito pequenos, a área da superfície do maciço mobilizada aumenta consideravelmente até ao final da construção (Figura 4.35(d)).

O seu máximo é de 1,0 mm durante a escavação da vala e colocação das lamias bentoníticas, e de 0,7 mm durante a betonagem de cada painel. A redução de valores da 1ª para a 2ª fases é na ordem de 35%, assim como nos deslocamentos dz .

O assentamento é, dos três tipos de deslocamentos analisados, o que toma menores valores. Segundo a Figura 4.29 os assentamentos máximos durante a escavação dos painéis tomam a mesma ordem de valores dos deslocamentos dz durante a sua betonagem.

4.5 Conclusões

A simulação do caso bidimensional através do modelo tridimensional mostrou resultados idênticos aos obtidos com o modelo $2D$, tanto para o modelo WIP como para o modelo WIM.

Considerando a modelação de apenas um painel de parede moldada, estudou-se o efeito de refinamento da malha do modelo e da sua dimensão. Verificou-se que o refinamento não era muito importante para os resultados dos deslocamentos do solo no tardo do painel. Quanto à largura do modelo, verifica-se que esta deve ser suficientemente larga de modo a abranger os deslocamentos verticais significativos na superfície do maciço, o que se garante com uma largura de solo adjacente ao painel de 40 m, $2h$, sendo h a altura da parede.

Tendo-se escolhido a malha conveniente para a modelação do problema de um painel de parede moldada, analisou-se os efeitos de instalação da mesma no terreno. Verificou-se que a fase da escavação da vala e colocação das lamas bentoníticas resultam um alívio de tensões nas faces frontal e lateral da vala, e na sua transferência o solo que se situa abaixo e ao lado da mesma. As tensões voltam a ser reajustadas na fase de betonagem do painel, com a redistribuição de parte das tensões para o solo no tardo do painel.

Os deslocamentos, nas três direcções, são máximos para a fase de escavação da vala. O deslocamento dx máximo dá-se na zona inferior da face frontal da vala, o assentamento máximo dá-se na superfície do maciço, junto ao topo da vala, e o deslocamentos dz máximo dá-se na face lateral da vala.

Em comparação destes resultados com os obtidos no capítulo anterior, em modelação bidimensional, verifica-se que o comportamento de um maciço tridimensional, face à instalação de uma parede moldada, apresenta deformações 5 a 6 vezes menores que as previstas no modelo $2D$. Assim considera-se que o estudo tridimensional do problema poderá ter importância para uma previsão mais aproximada do problema real.

O terceiro problema analisado neste capítulo é o estudo da instalação de uma parede moldada com 40 m de largura, constituída por 8 painéis de 5 m. Em análise dos deslocamentos desenvolvidos ao longo da construção da parede verificou-se que, ao longo da construção, os deslocamentos obtidos durante a escavação de uma vala é menor na instalação do primeiro painel, do que nos painéis seguintes. Esta variação origina que os deslocamentos do solo no final da construção da parede sejam maiores na zona dos últimos painéis construídos, e menores na zona do 1º painel.

Após a instalação de um painel, o efeito de instalação do painel seguinte apenas se regista para os deslocamentos verticais à superfície do terreno. A deformada do solo no

tardoz da parede em pouco se altera após a betonagem do próprio painel.

A modelação tridimensional regista um novo aspecto, a deformação das paredes laterais da vala durante o processo construtivo. A fase mais desfavorável é a fase de escavação da vala para o 1º painel, em que a face se deforma para o interior da vala com deslocamentos próximos de 1,5 mm.

Capítulo 5

Estudo Paramétrico

5.1 Introdução

No capítulo anterior apresentou-se os resultados da análise tridimensional da instalação de um painel de parede moldada isolado e de uma sequência de oito painéis. O presente capítulo retoma o caso da execução dos oito painéis, com o objectivo da realização de uma análise paramétrica que incidirá sobre:

- influência das tensões iniciais no maciço;
- influência da largura dos painéis constituintes da parede moldada;
- influência da espessura da parede moldada.

5.2 Definição do problema base e das análises efectuadas

O modelo tridimensional é constituído por um maciço terroso e uma parede moldada, com características e geometria iguais às definidas no capítulo anterior.

Consideraram-se dois tipos de solos diferentes, ambos argilosos, modelados segundo o comportamento de *Mohr-Coulomb* disponível no programa de cálculo utilizado *Plaxis 3D*.

Os solos em estudo têm as características apresentadas no Quadro 5.1. Os parâmetros do Solo 1 correspondem a um solo argiloso rijo e sobreconsolidado. O Solo 2 apresenta as características de um solo argiloso ligeiramente sobreconsolidado. As análises destes dois solos são conduzidas em condições não drenadas, e analisadas em termos de tensões efectivas, encontrando-se o nível freático à superfície do terreno.

Os solos foram considerados com comportamento elástico-perfeitamente plástico, com módulo de deformabilidade dado pela equação $E(y) = E_{ref} + E_{inc} \cdot y$ em que E_{ref} é o módulo à superfície do terreno e E_{inc} o incremento de E com a profundidade, a partir de uma altura de referência y_{ref} .

Quadro 5.1: Características dos solos utilizados no estudo paramétrico.

	Solo 1	Solo 2
Tipo de Solo	argila	argila
$c' (kPa)$	0	0
$\phi' (^{\circ})$	35	28
$\psi' (^{\circ})$	5	0
$E_{ref} (kPa)$	6000	3000
$E_{inc} (kPa/m)$	867	435
$\gamma_{unsat} (kN/m^3)$	20	20
$\gamma_{sat} (kN/m^3)$	20	20
ν	0,3	0,3
$y_{ref} (m)$	30,0	30,0
K_0	1,5	0,7

O Quadro 5.2 apresenta os cálculos efectuados com o modelo tridimensional. Alguns cálculos foram também reproduzidos bidimensionalmente, como o caso do estudo da influência das tensões iniciais no maciço e da espessura dos painéis.

Quadro 5.2: Cálculos efectuados na análise paramétrica.

Parâmetros em estudo	Solo 1	Solo 2
Coeficiente de impulso em repouso, K_0	0,5	-
	0,7	0,7
	1,0	1,0
	1,5	1,5
	2,0	2,0
Largura dos painéis, $L(m)$	5	4
	10	5
	20	6
	40	10
Espessura dos painéis, $e(m)$	0,2	0,2
	0,4	0,4
	0,8	0,8

Indica-se a "negrito" os valores correspondentes ao caso base.

5.3 Influência do estado de tensão inicial do maciço

Para o estudo da influência do estado de tensão inicial no maciço utilizou-se o modelo tridimensional de uma parede moldada com 0,4 m de espessura e 40 m de largura constituída por 8 painéis de 5 m, quer para o Solo 1, quer para o Solo 2.

Para o caso do Solo 1 foram estudados 5 casos diferentes (Quadro 5.2) em que K_0 varia com os valores de 0,5, 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0. A Figura 5.1 representa as tensões efectivas horizontais instaladas na fase inicial da construção da parede dependendo do coeficiente de

impulso em repouso admitido. No caso do Solo 2 apenas se estudaram as situações para K_0 igual a 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0, visto se ter verificado que para o caso de K_0 igual a 0,5 o cálculo não converge.

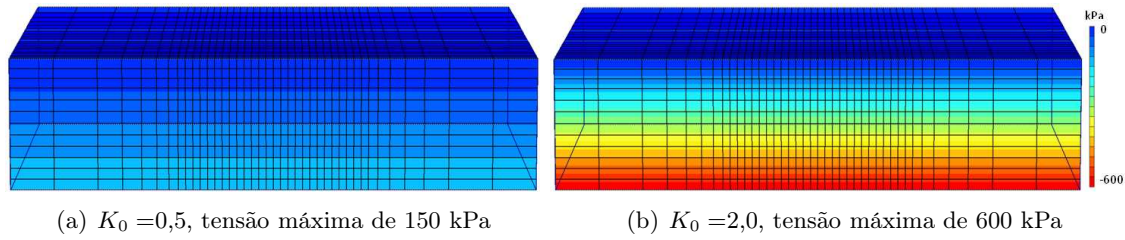


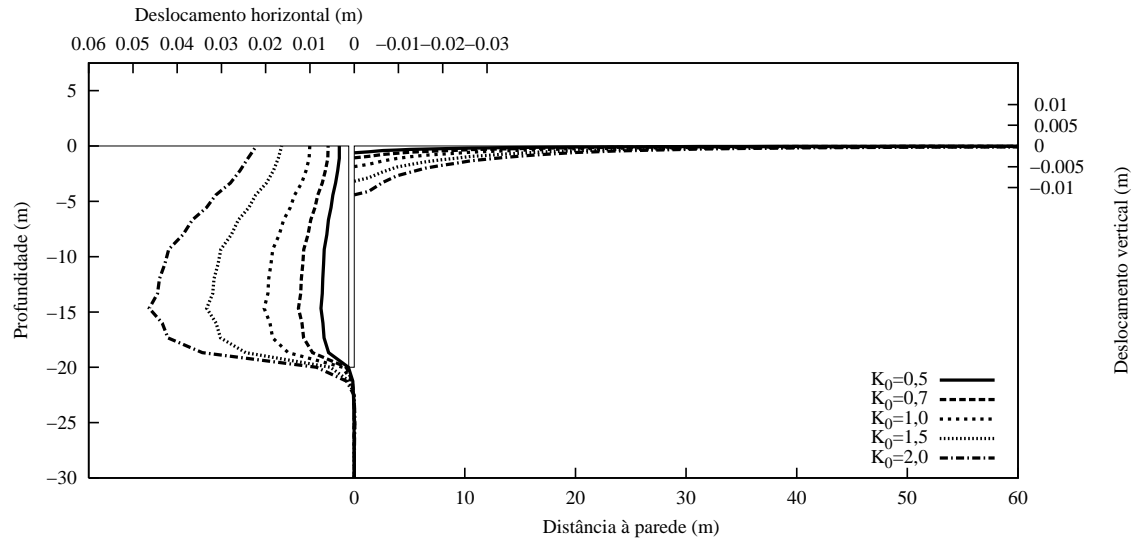
Figura 5.1: Tensão efectiva horizontal, σ'_x , no maciço na fase inicial.

As tensões efectivas horizontais na direcção do X , σ'_x , têm desenvolvimento linear em profundidade com valor nulo à superfície e valor máximo de 600 kPa a 30,0 m de profundidade para o caso de $K_0 = 2,0$ e um valor de 150 kPa para o caso $K_0 = 0,5$ à mesma profundidade, Figura 5.1.

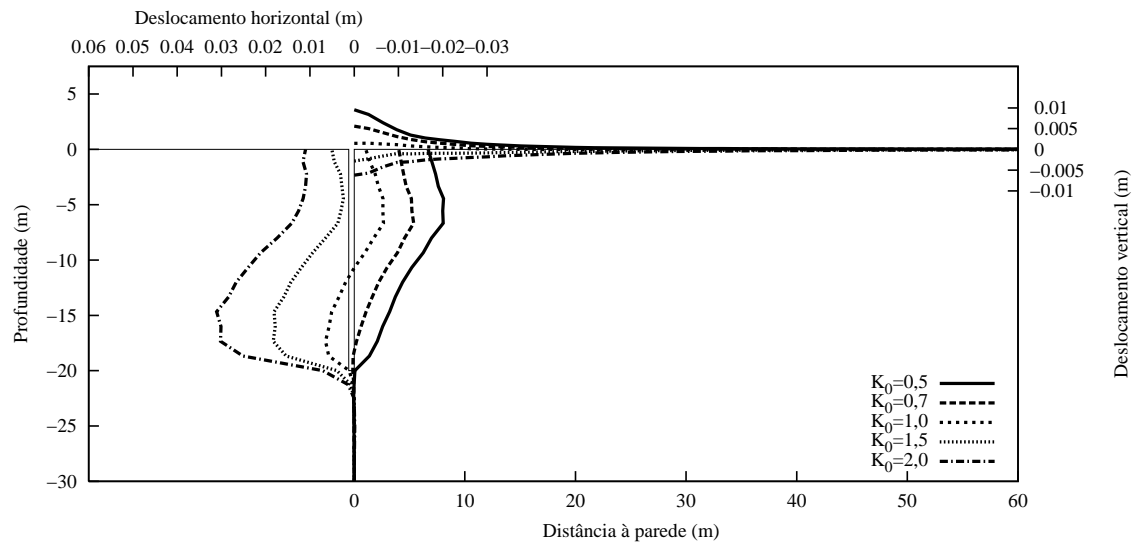
5.3.1 Aplicação do estudo da influência do estado inicial do terreno a um maciço constituído pelo Solo 1

A Figura 5.2(a) apresenta os deslocamentos horizontais da superfície vertical da vala e os assentamentos da superfície do terreno suportado na primeira fase de construção da parede moldada, em que se escava e se coloca bentonite na vala do primeiro painel, do total de oito a construir. Desta figura pode concluir-se que:

- Os deslocamentos são aproximadamente proporcionais ao coeficiente de impulso em repouso, verificando-se assim um muito significativo efeito deste coeficiente.
- O desenvolvimento dos deslocamentos é semelhante, apesar de os valores atingidos pelos deslocamentos serem bastante diferentes. Durante a fase de escavação da vala a face vertical da vala desloca-se para o interior do trecho escavado e a superfície do terreno tende a assentar a partir do topo da vala.
- Os assentamentos à superfície do maciço tomam valores consideráveis desde a vala até uma distância de 20 m, diminuindo esta distância de influência à medida que baixa o valor de K_0 .
- Os deslocamentos horizontais são maiores na zona inferior da vala e menores no topo desta, e, à medida que K_0 aumenta, esta diferença, entre o topo e a zona inferior da vala, tende também a aumentar.
- Os assentamentos, por sua vez, tomam o seu maior valor junto ao topo da vala, diminuindo com o aumento da distância a esta. Este deslocamento desenvolve-se com duas concavidades, a primeira orientada para cima e a segunda, com os menores assentamentos, virada para baixo.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.2: Deslocamento horizontal do solo no tardoz da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 1.

Durante a fase de betonagem do 1º painel da parede moldada o solo reage às pressões aplicadas pelo betão, como mostra a Figura 5.2(b):

- O impulso do betão contra a face da vala impele-a no sentido contrário ao deslocado na fase anterior.
- Quanto aos deslocamentos horizontais da face da vala, para K_0 com valores iguais a 2,0 e 1,5 a sua face continua deformada para o interior da vala; para os casos com K_0 igual a 1,0, 0,7 e 0,5 os deslocamentos são no sentido contrário.
- Para K_0 igual a 2,0 e 1,5, a superfície do terreno continua a apresentar assentamentos, embora menores do que os da fase anterior (escavação e bentonite); para K_0 com

valores iguais a 1,0, 0,7 e 0,5 observam-se empolamentos, provocados pelas pressões do betão fresco.

- Verifica-se também que à medida que a face da vala tende a deslocar-se para o interior do maciço, a sua deformada perde o efeito côncavo que tinha obtido da fase de escavação.
- Da fase anterior (escavação e bentonite) mantém-se a distância de influência à superfície do terreno, com assentamentos significativos até aos 20 m medidos perpendicularmente desde o topo da vala betonada.
- Os deslocamentos máximos, nesta fase, tomam valores para os dois sentidos. O solo com $K_0 = 2,0$ continua a apresentar o maior deslocamentos horizontal para dentro da vala, assim como o maior assentamento à superfície do terreno, os seus valores são de $\delta h_{max} = 31$ mm e $\delta v_{max} = 6$ mm, respectivamente. No sentido contrário, para o interior do maciço e no empolamento da superfície do terreno, os valores são maiores para o solo em que $K_0 = 0,5$, com $\delta h_{max} = 20$ mm e $\delta v_{max} = 10$ mm.

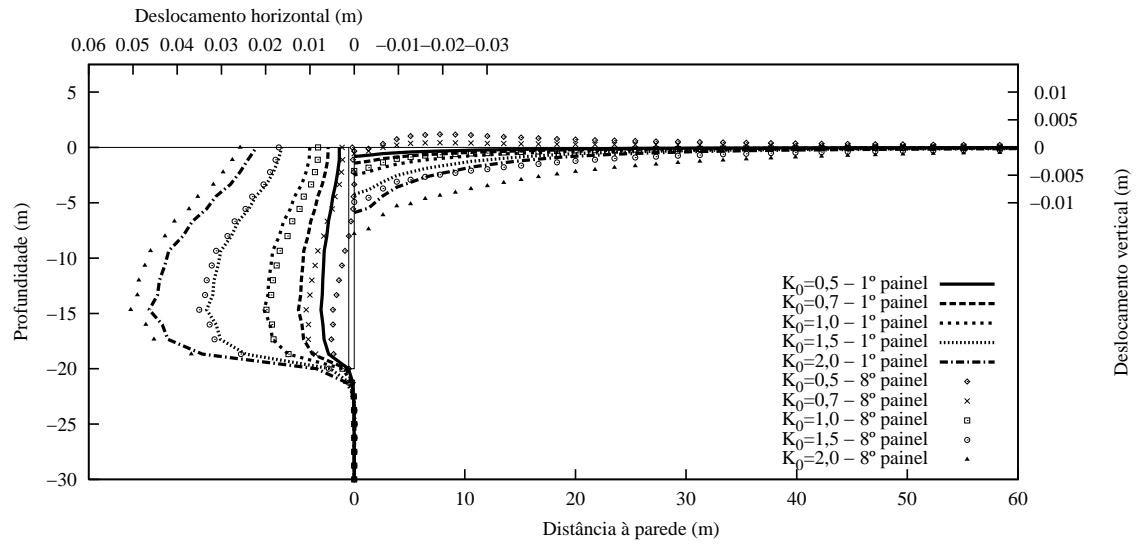
Faz-se notar que a figura apresentada mostrou apenas os resultados obtidos para a execução do 1º painel. A execução dos oito painéis sequencialmente foi provocando deslocamentos no terreno adjacente a esses painéis. Mostra-se nas Figuras 5.3(a) e 5.3(b) os resultados para o último painel sobrepostos aos do 1º painel. A primeira é referente à escavação da vala e colocação da bentonite no seu interior, e a segunda é referente à betonagem do próprio painel. Analisando a primeira figura, verifica-se que, a nível geral, o traçado das várias deformadas é idêntico ao do 1º painel construído. A forma côncava da face da vala é muito semelhante, assim como os assentamentos na superfície do terreno.

No entanto, é possível verificar algumas diferenças. Os solos K_0 igual a 1,5 e 2,0, que tinham os maiores deslocamentos no 1º painel, mostram agora que neste último painel se deslocam um bocado mais para dentro da vala, enquanto que os restantes solos, com K_0 igual a 1,0, 0,7 e 0,5, mostram um recuo face ao obtido anteriormente.

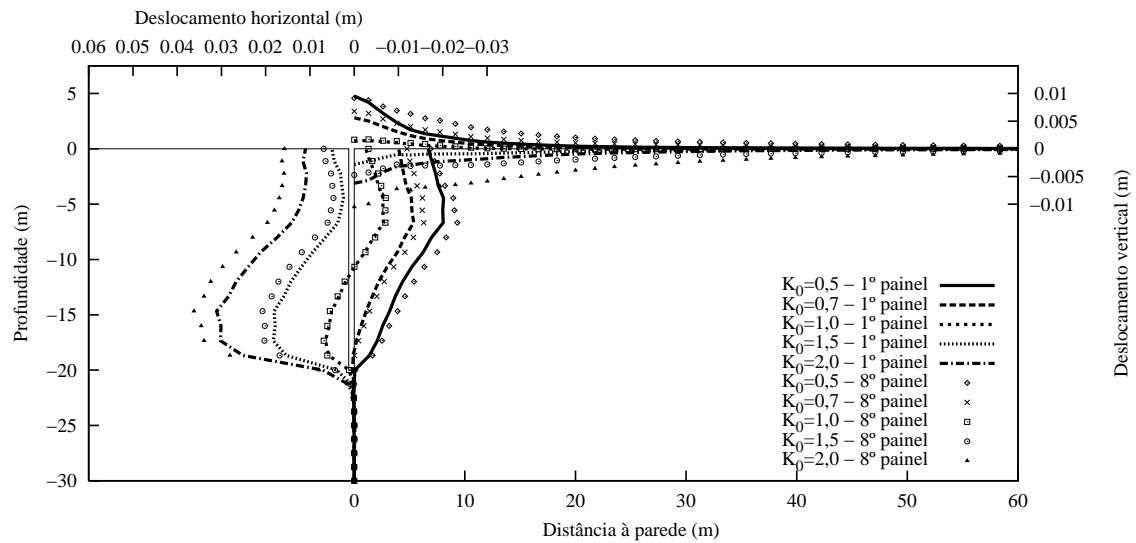
Este efeito sente-se igualmente nos assentamentos à superfície do maciço, chegando mesmo a verificarem-se empolamentos para os dois solos com menores tensões iniciais, na fase de escavação da vala e colocação das lamelas bentoníticas.

A razão para este comportamento pode ser compreendida pelos resultados obtidos para o painel isolado. Com efeito, para o K_0 elevados, o efeito global (das duas fases) nos deslocamentos horizontais da vala é de sinal positivo, ou seja, é para o interior desta, ao passo que para K_0 baixos tal efeito é negativo. Tal implica que a sucessiva execução de painéis em solo com K_0 elevado vai causando, na zona dos painéis adjacentes, um efeito de sinal positivo, que se traduz no caso do último painel, nos deslocamentos que a Figura 5.3 mostra. Pelo contrário, para K_0 baixos, verificar-se-á o oposto, o que justifica os deslocamentos inferiores.

O processo de transferência de carga na horizontal é responsável por este comportamento, pois ao longo da construção de um painel o solo adjacente fica sempre afectado



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.3: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro e último painéis da parede, para o Solo 1.

devido à redistribuição de tensões.

Também a distância de influência à superfície se alterou neste último painel. Os 20 m que anteriormente tinham os assentamentos mais consideráveis do maciço passam a ser o dobro, 40 m medidos desde a face da vala.

A evolução da 1ª para a 2ª fase neste último painel dá-se do mesmo modo que se deu no 1º painel. O solo recua sobre o maciço diminuindo os deslocamentos aí instalados da fase da escavação (Figura 5.3(b)). A diferença para este painel é que, como na fase anterior, os solos com maiores tensões iniciais tendem em deslocar-se mais para o interior da vala, assentando à superfície do terreno, e os solos de menores tensões iniciais tendem a recuar mais sobre o maciço, empolando à superfície. Apenas o solo com $K_0 = 1,0$ mostra, nesta fase de betonagem, que existe pouca diferença entre os deslocamentos obtidos da construção do 1º painel e os do último painel (Figura 5.3).

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram em pormenor a evolução dos deslocamentos horizontal e vertical, respectivamente, no decorrer da instalação dos 8 painéis, para o maciço constituído pelo Solo 1 com $K_0 = 0,5$.

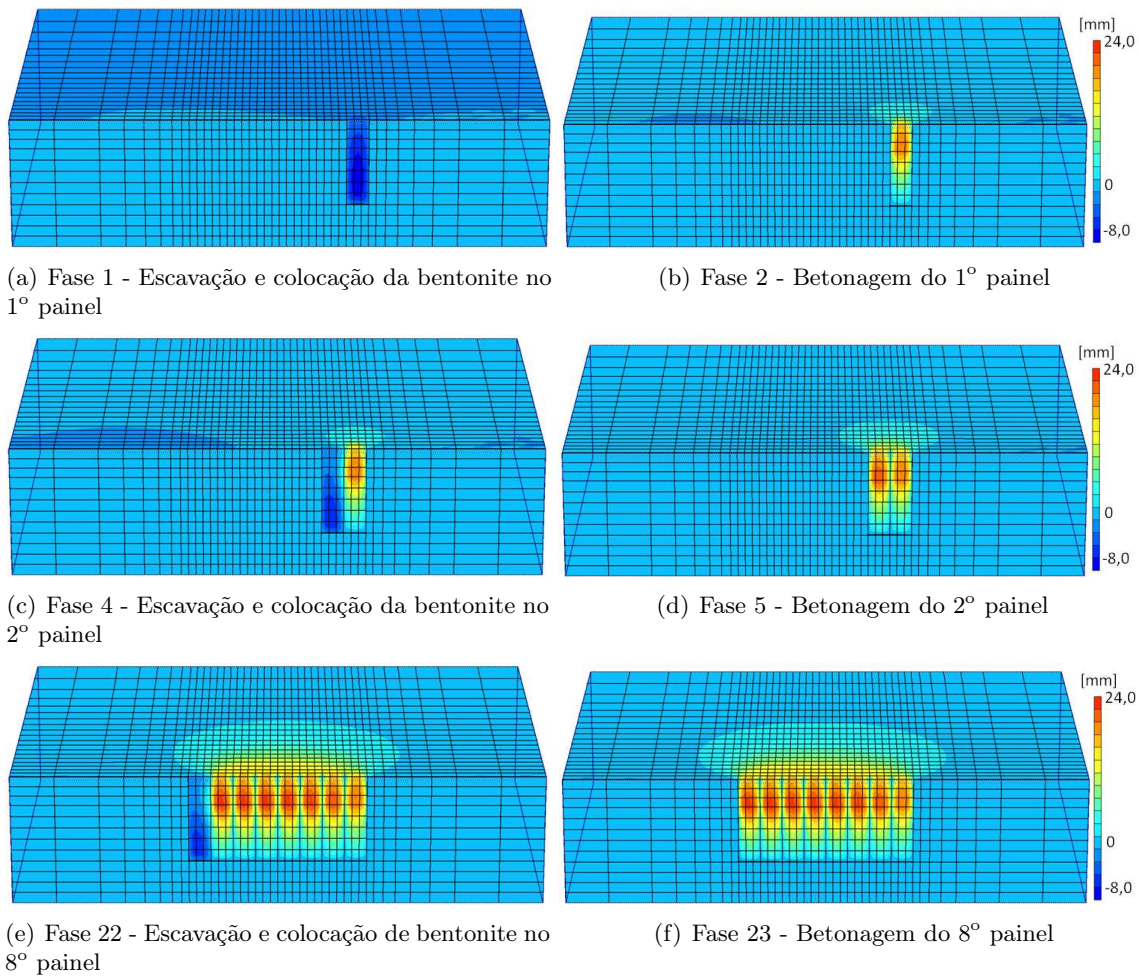


Figura 5.4: Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 0,5$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.

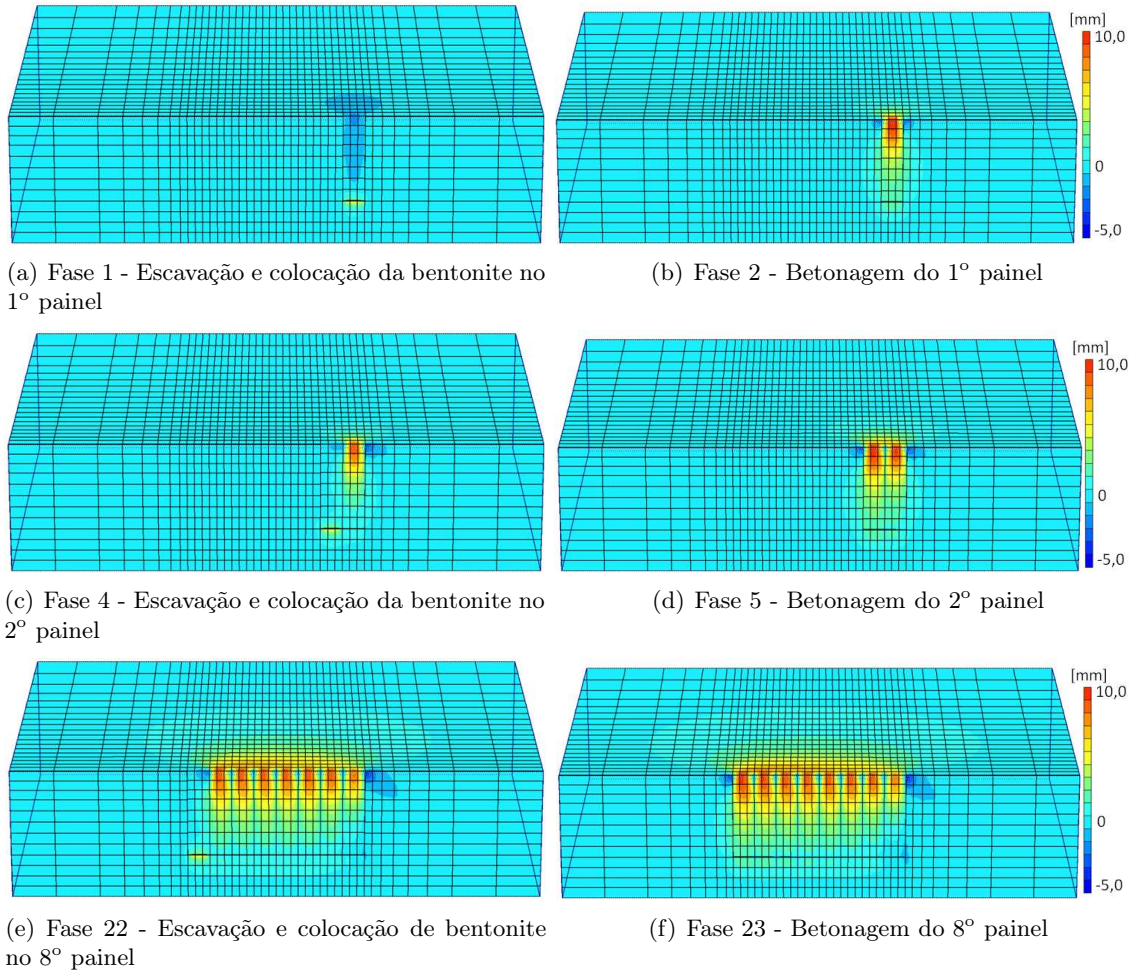


Figura 5.5: Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 0,5$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.

Pode-se observar na Figura 5.4 que, para o solo com $K_0 = 0,5$, na fase de escavação e bentonite de cada painel, os deslocamentos para o interior da vala são causados pela descompressão do solo no seu tardo. Com a betonagem, este mesmo solo sofre uma elevada compressão pelas pressões do betão fresco, originando em todos os painéis um deslocamento horizontal negativo, ou seja, para o interior do maciço.

Estas duas fases têm comportamentos distintos, assim como são diferentes as localizações dos deslocamentos máximos para ambas. Enquanto que na primeira fase (bentonite) δ_{hmax} se dá na zona interior da face da vala, para a segunda fase (betão fresco) este situa-se na zona superior da vala.

À medida que se avança na construção verifica-se que δ_{hmax} na fase da escavação diminui, sempre no último painel construído, enquanto que durante a execução da betonagem o δ_{hmax} tende a aumentar a cada painel construído.

O comportamento do solo, em termos de deslocamentos verticais (Figura 5.5) é idêntico ao dos horizontais. Durante a fase de escavação o solo tende a assentar à superfície do terreno, empolando na fase seguinte, e com valores crescentes à medida que se avança na instalação dos painéis.

O δ_{vmax} verifica-se no topo da vala, durante a escavação do último painel. Os empolamentos dão-se em toda a zona superior do maciço, perto da vala, propagando-se ao longo do maciço, até uma distância próxima de $2/3$ do comprimento deste.

O fundo da vala sofre empolamento em todas as fases em que se escava um painel, recuperando parte dos deslocamentos nas fases de betonagem dos mesmos.

O comportamento do maciço do mesmo solo, mas com maiores tensões iniciais é bastante distinto do analisado anteriormente. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os deslocamentos horizontais dx e verticais durante a instalação dos 8 painéis, para o caso do Solo 1, com $K_0 = 2,0$.

Ao contrário do registado no solo anterior ($K_0 = 0,5$), os deslocamentos horizontais dx do solo na face frontal da vala dá-se, em ambas as fases, na direcção do interior da vala. Na 1ª fase, em que se escava a vala e se coloca a lama bentonítica, este deslocamentos dx é maior (que na 2ª fase), e dá-se maioritariamente na zona média e inferior da vala, verificando-se menores deslocamentos no topo da face frontal da vala (Figura 5.6(a)).

A 2ª fase, em que se substitui a bentonite pelo betão, apresenta deslocamentos dx menores aos da fase anterior. O solo da face frontal da vala, recupera parte da sua deformação, principalmente na zona superior. O deslocamento máximo desta fase verifica-se a zona interior da vala, ao contrário do registado no solo anterior ($K_0 = 0,5$), onde o δ_{hmax} da 2ª fase se dava no topo da vala (Figura 5.6(b)).

Como no solo anterior, os deslocamentos dx são maiores no plano médio da vala, diminuindo até aos bordos desta.

À medida que se vão instalando os painéis seguintes, verifica-se que:

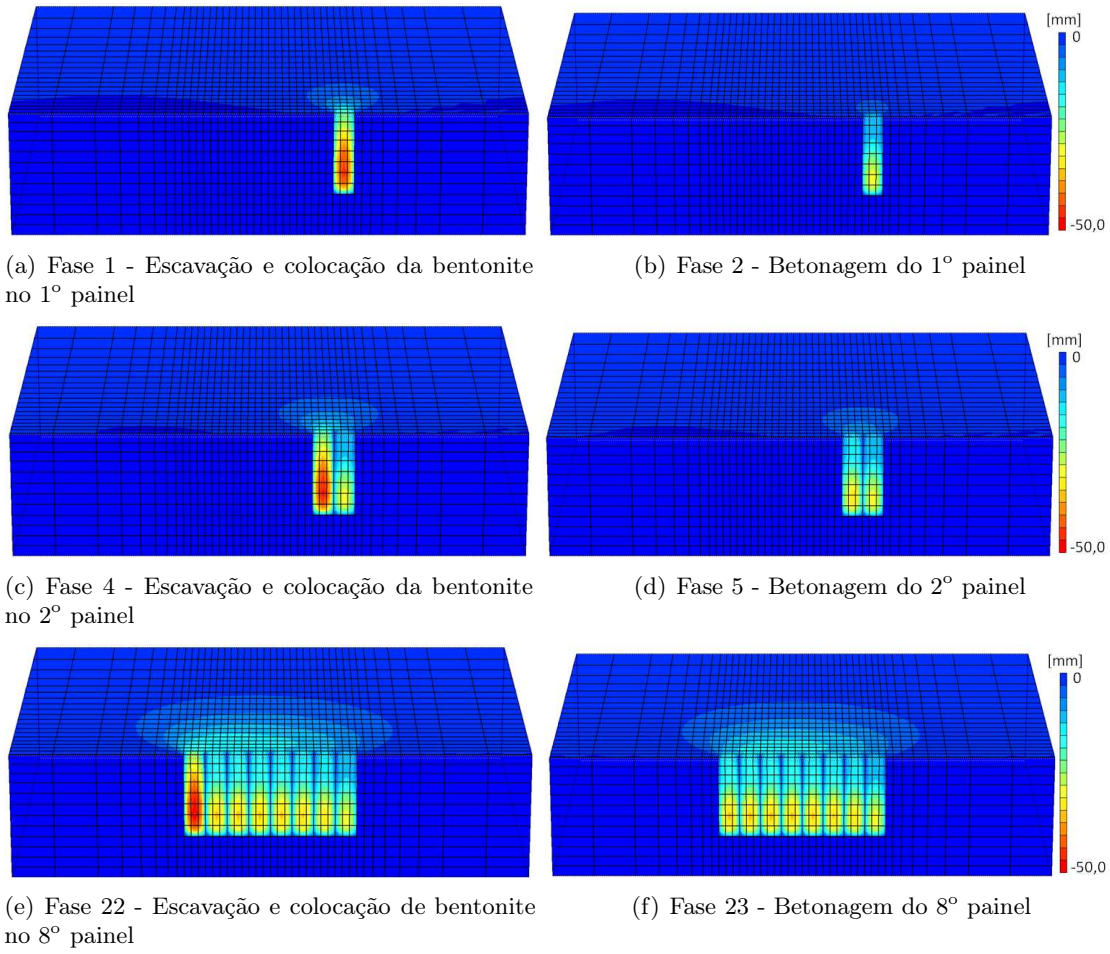


Figura 5.6: Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.

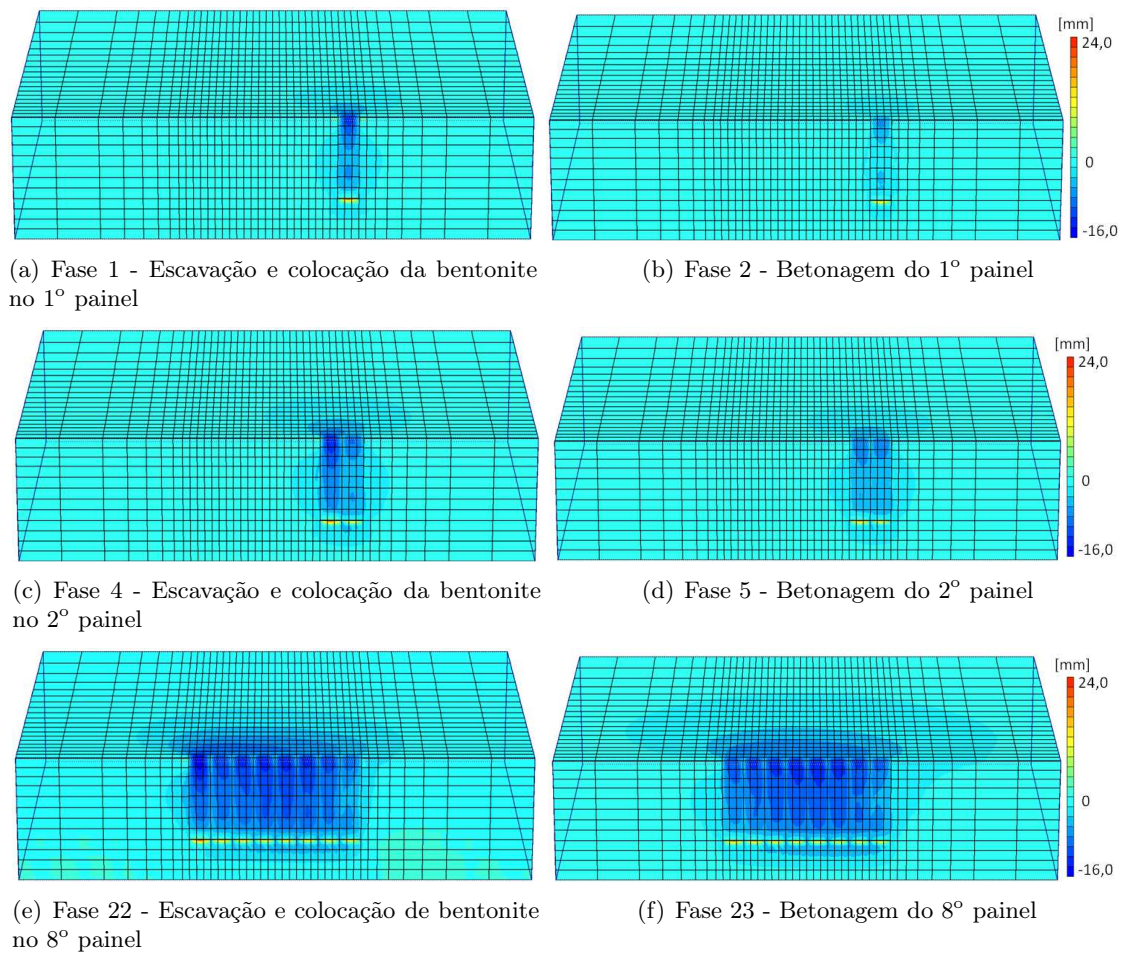


Figura 5.7: Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 1.

- Os deslocamentos máximos dx aumentam à medida que se constrói mais um painel. Este fenómeno regista-se tanto na 1ª como na 2ª fase de cada painel instalado.
- A superfície do maciço também sofre deslocamentos nesta direcção (dx) e a distância a que se propagam, no final da construção, é de 1/3 do comprimento total do maciço modelado.
- No final da construção, verifica-se que a zona inferior da face da vala é a parte que permanece com mais deslocamentos dx , em todo o maciço.

Os deslocamentos verticais (dy), durante o faseamento construtivo, desenvolvem-se segundo o ilustrado na Figura 5.7. À excepção dos deslocamentos sofridos pelo fundo de vala (empolamentos), o restante maciço assenta, face à instalação da parede moldada.

Em comparação com o solo anterior ($K_0=0,5$, com menores tensões iniciais) verifica-se que, no campo dos deslocamentos verticais, a instalação de um painel perturba mais o solo que se encontra adjacente a este, quer à superfície do maciço, quer na lateral do painel instalado (Figura 5.7(a)).

Os assentamentos máximos dão-se na fase de escavação da vala e são maiores à medida que se instalam mais painéis da parede. O topo da vala e a superfície do terreno próxima desta são as zonas onde se dão os maiores assentamentos. Com o aumento da parede moldada, aumenta também a zona de terreno afectada pela sua instalação, principalmente na superfície do maciço, que apresenta assentamentos até 2/3 do seu comprimento (Figura 5.7(f)).

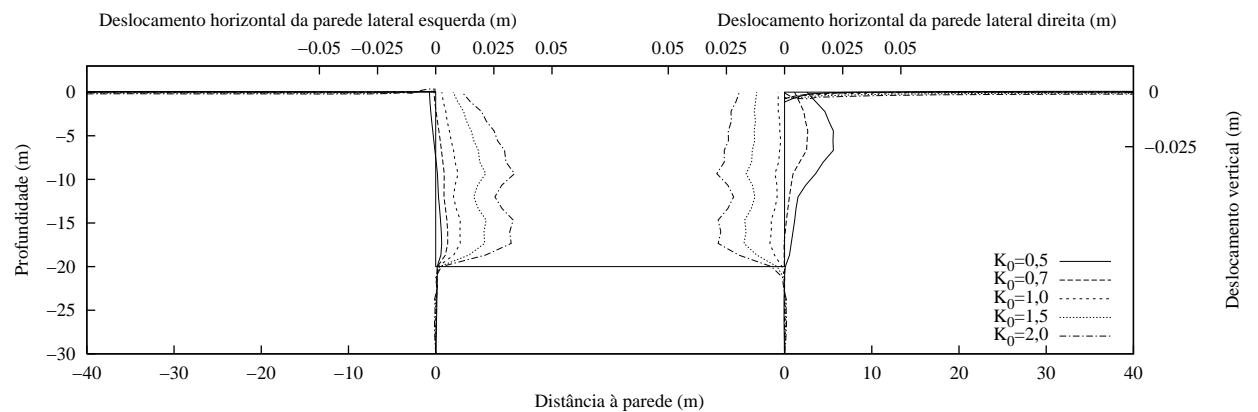
As Figuras 5.8(a) e 5.8(b) representam os deslocamentos horizontal dz e vertical no plano frontal do maciço, no instante em que se escava e se betona o último painel (situado do lado esquerdo da parede), para os 5 valores de K_0 modelados. Os deslocamentos são os das duas faces laterais extremas da parede moldada, assim como os da superfície do terreno, no mesmo plano frontal.

A face lateral direita é uma face do 1º painel instalado; a face lateral esquerda, é a face que mais afastada desta, pertencente ao 8º painel.

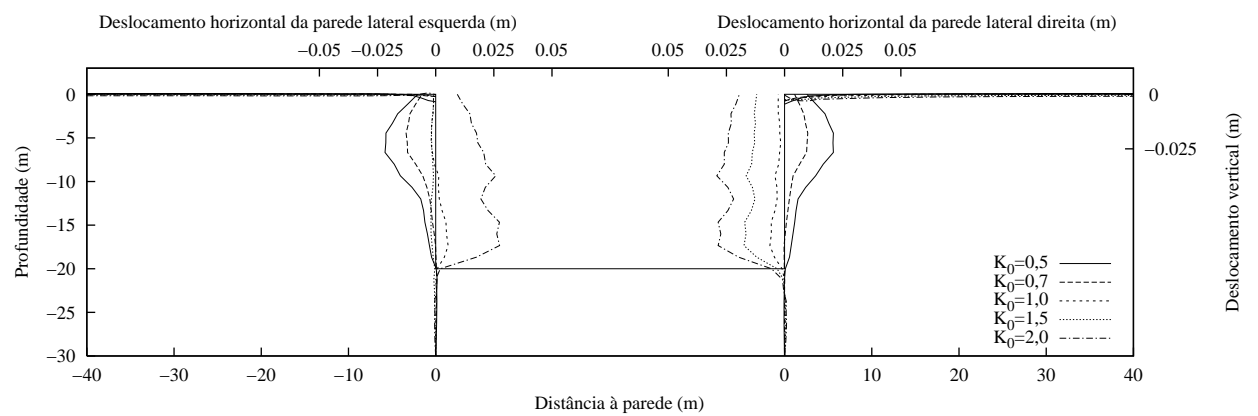
Pode verificar-se que os deslocamentos da face lateral do lado direito praticamente não variam de uma fase para a outra, o que é motivado pelo facto do painel em execução ser o 8º, ou seja, o que está mais afastado desta face.

Os deslocamentos horizontais dz da face lateral esquerda são muito pequenos para os solos com $K_0 < 1,0$, na 1ª fase, aumentando para o interior da vala com o aumento das tensões iniciais (K_0) dos modelos. A superfície do terreno apresenta pouca perturbação, apenas um pequeno empolamento junto ao topo da vala, para o solo com $K_0 = 2,0$.

Os solos com $K_0 = 0,5$ e $0,7$ registam um considerável deslocamento dz para o interior da vala e um pequeno assentamento da superfície do terreno junto ao topo da vala.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.8: Deslocamento horizontal do solo da face lateral da vala e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 1.

Os solos com $K_0 = 1,0$ e $1,5$ recuperam, quase na totalidade, a deformação originada da fase anterior, mantendo apenas pequenos deslocamentos dz na zona inferior da vala.

Para o solo com maiores tensões iniciais ($K_0 = 2,0$) o deslocamento horizontal dz , da face lateral esquerda da vala, recupera apenas um pouco do deslocamento da fase anterior, mantendo praticamente a mesma deformada.

Comparando os deslocamentos totais obtidos da modelação do 5 solos com diferentes K_0 , 0,5, 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0, a partir da Figura 5.9, respectivamente, pode-se avaliar a influência das tensões iniciais no solo para instalação de uma parede moldada. Pode-se observar pela Figura 5.9 que:

- Para os maciços em que $K_0 < 1,0$, a fase de escavação dos painéis é pouco condicionante, comparativamente à fase de betonagem dos mesmos, que por sua vez é a que apresenta maiores deslocamentos.
- Nesta 2ª fase, para estes solos, os deslocamentos dão-se para o interior do maciço, empolando a sua superfície.
- As faces laterais da vala reagem de forma idêntica à face frontal da mesma, com a instalação da parede. Para estes dois casos deslocam-se contra o solo.
- À medida que o K_0 aumenta, a 1ª fase começa a ter maiores importância, face à 2ª, com o aumento dos seus deslocamentos para o interior da vala e assentando a superfície do terreno.
- Em ambos os casos, a perturbação final do maciço é maior na zona superior da vala, assim como na superfície do terreno próximo desta.

O modelo com $K_0 = 1,0$, representado nas Figuras 5.9(e) e 5.9(f), é a situação intermédia dos casos analisados. As faces frontal e laterais da vala deslocam-se para o interior da vala, na 1ª fase, e recuperam parte da sua deformação na 2ª fase (betonagem).

Na fase de betonagem, Figura 5.9(f), o solo no tardo da parede encontra-se deformado com dupla concavidade. A zona superior da vala está deformada para o interior do maciço, enquanto que a zona inferior encontra-se deslocada para o interior da vala (ver em pormenor na Figura 5.3(b)).

Para os solos com $K_0 > 1,0$ confirma-se que a fase de escavação da vala é a que apresenta maiores deslocamentos. A 2ª fase, no entanto, apesar de recuperar a deformação da fase anterior, mantém a sua deformada para o interior da vala, em toda a altura da sua face.

Em comparação com os solos com $K_0 < 1,0$, a superfície do maciço sofre menos deslocamentos totais durante a instalação da parede. Já na fase final, a zona inferior da vala é a que apresenta maiores deslocamentos finais.

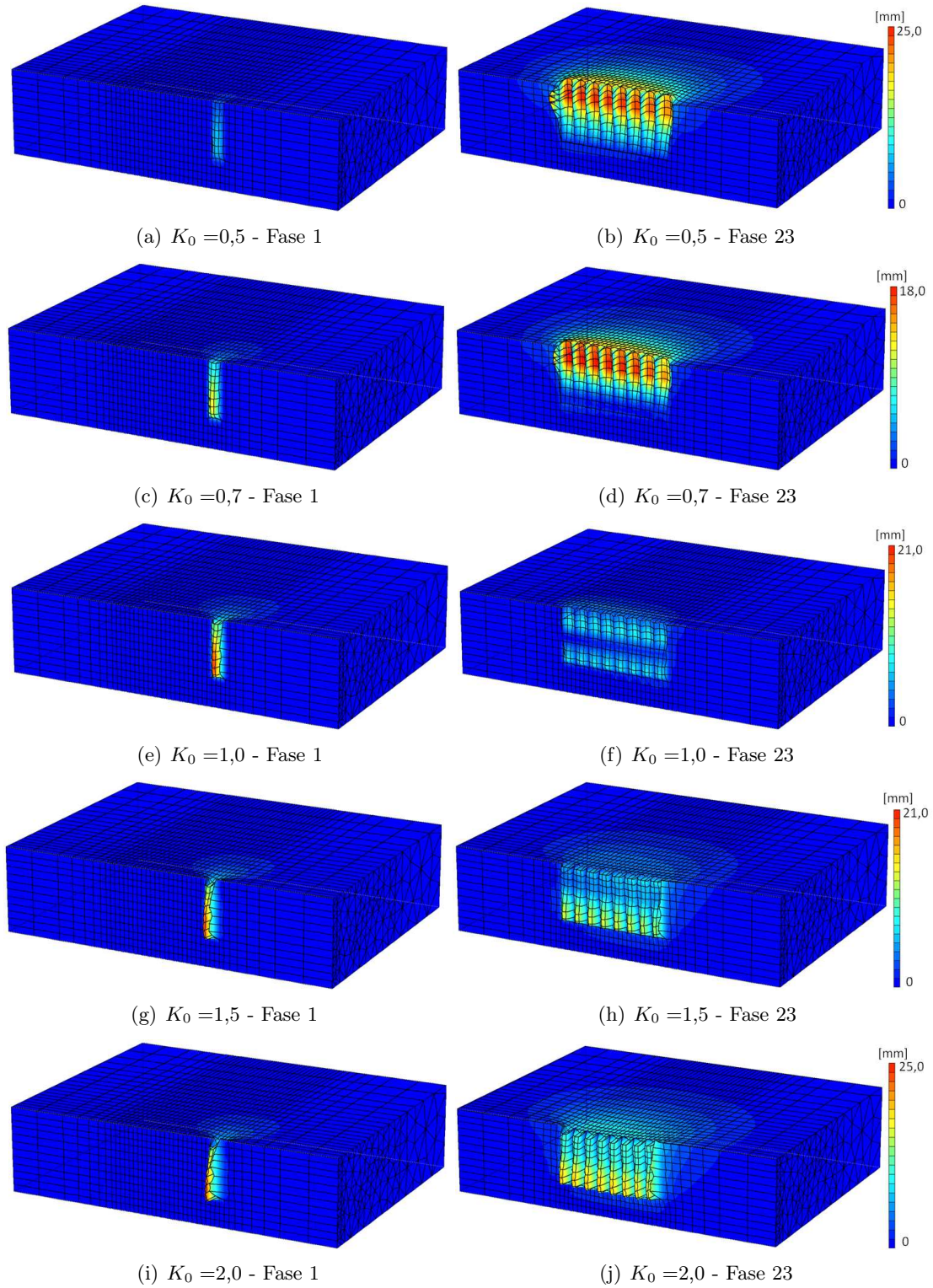


Figura 5.9: Desenvolvimento deslocamentos totais no Solo 1, no início (Fase 1, à esquerda, escavação e colocação da bentonite no 1º painel) e no final (Fase 23, à direita, betonagem do 8º painel) do processo construtivo da parede moldada, para os diferentes valores de K_0 .

Efectuou-se o mesmo estudo paramétrico para os modelos $2D$, com a mesma variação de K_0 . As Figuras 5.10(a) a 5.12(b) mostram que as deformações obtidas podem ser 4 a 6 vezes maiores os resultados obtidos na análise tridimensional, comparando com o 1º e com último painel instalado. Verifica-se também que, a diferença dos deslocamentos entre cada solo nos modelos $2D$ é ainda maior que nos modelos $3D$, de onde se pode concluir que as tensões iniciais têm mais influência no maciço à medida que se aumenta a largura do painel, pois no modelo $2D$ considera uma parede com largura infinita, enquanto no modelo $3D$ cada painel tem apenas 5 m de largura. Este facto verifica-se em ambas das fases de construção, escavação e betonagem.

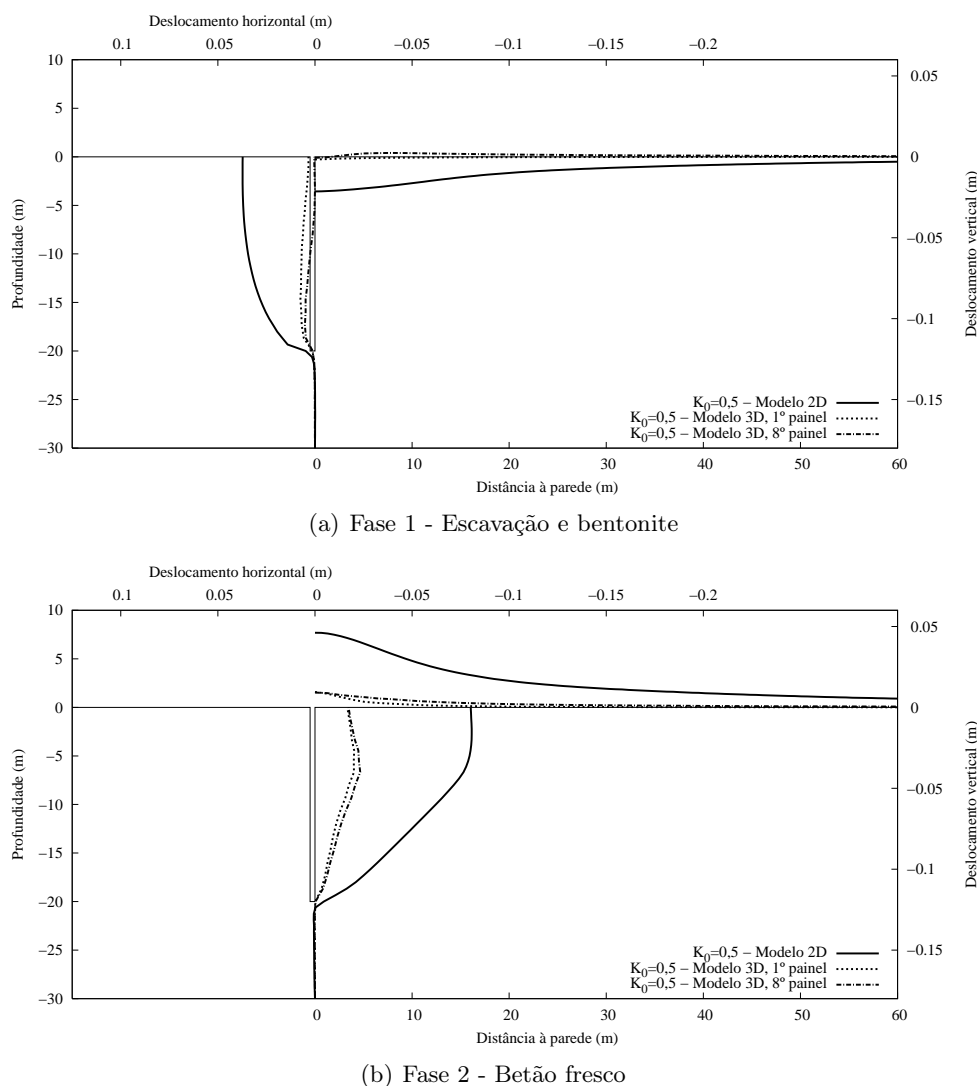
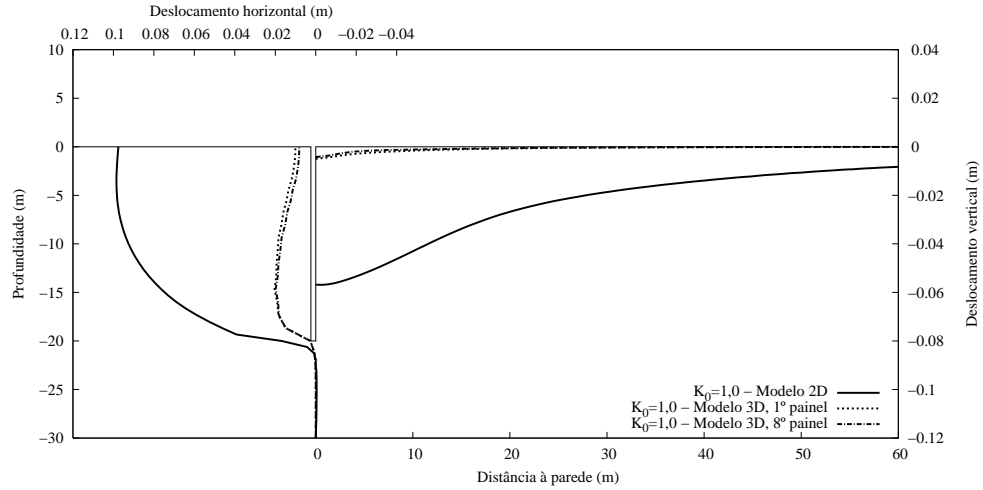
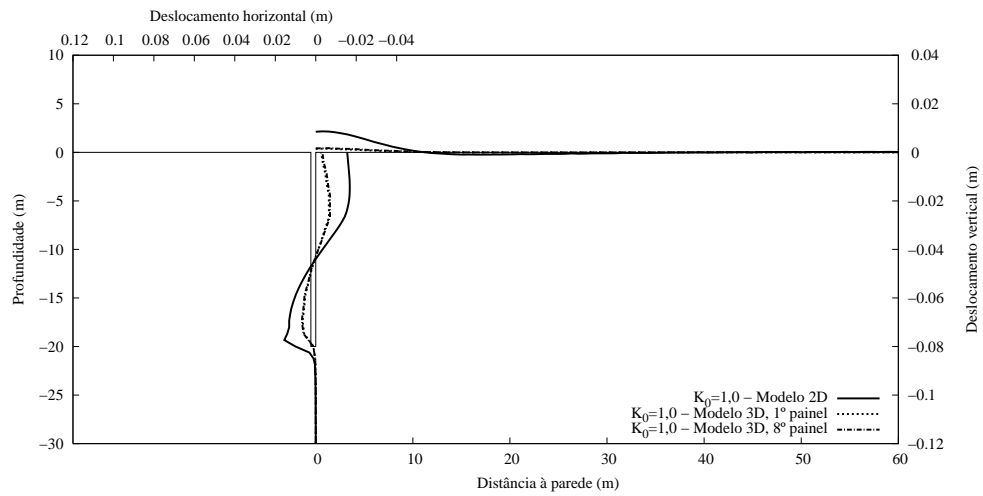


Figura 5.10: Deslocamento horizontal do solo no tardoz da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0 = 0,5$ - comparação do modelo $3D$ com o modelo $2D$.

O que também aumenta nesta análise é a distância de influência dos deslocamentos verticais à superfície do maciço. Enquanto que na análise anterior os δ_v deixavam de ter valores significativos, no máximo, a partir dos 40 m de distância à vala, aqui, pode-se verificar

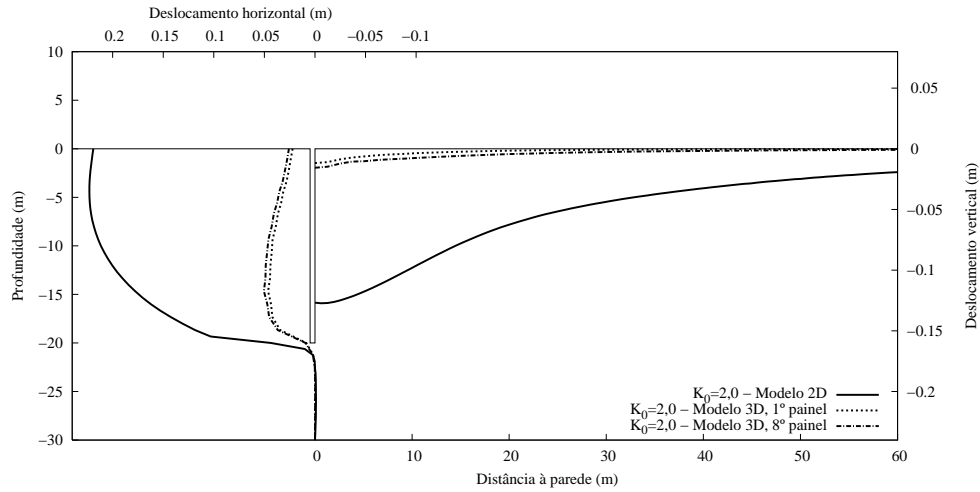


(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

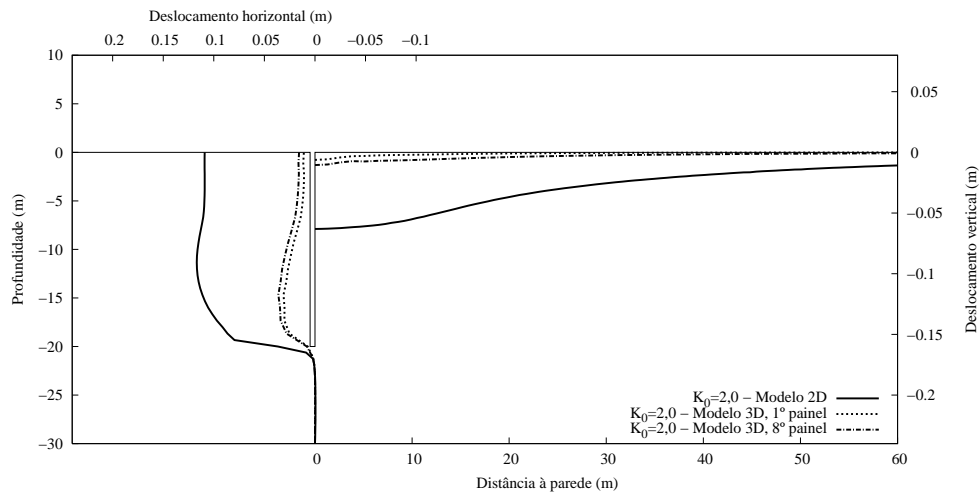


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.11: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0=1,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.12: Deslocamento horizontal do solo no tardoz da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 1 com $K_0=2,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.

que esta distância se amplia sensivelmente até aos 60 m. Este resultado deve-se ao facto de a consideração de uma parede com largura infinita também implicar a remoção de maior volume de terreno, e por sua vez, maior descompressão do solo no tardo da parede.

Garante-se no entanto que, o comportamento é idêntico, com o mesmo tipo de deformada, tanto na fase de escavação como de betonagem.

5.3.2 Aplicação do estudo da influência do estado inicial do terreno a um maciço constituído pelo Solo 2

Na continuação do estudo da influência das tensões iniciais na deformação do maciço, durante a construção de uma parede moldada, foi aplicado no mesmo modelo tridimensional o Solo 2.

Este solo, mostra-se ser bastante mais deformável do que o Solo 1, utilizado na secção anterior.

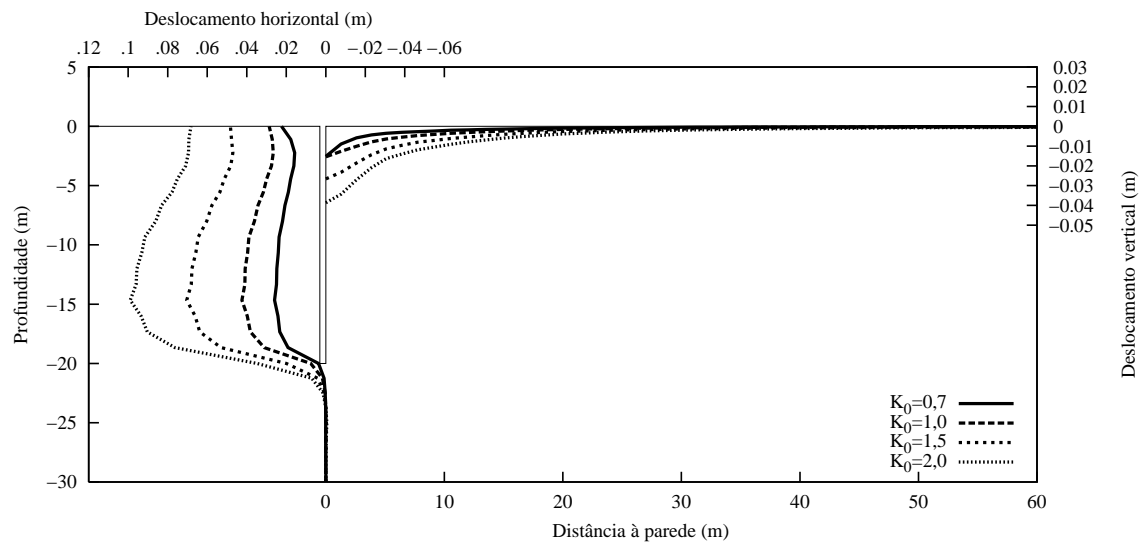
Na construção do primeiro painel, ilustrada nas Figuras 5.13(a) e 5.13(b), escavação e betonagem respectivamente, a deformada da face da vala e da superfície do maciço é, de forma geral, duas vezes superior à deformada verificada na modelação do Solo 1.

O estudo partiu da aplicação de K_0 diferentes, variando o seu valor entre 0,7, 1,0, 1,5 e 2,0. O solo com $K_0 = 0,5$ foi excluído deste estudo, pois mesmo tendo painéis com apenas 5 m de largura o solo colapsava, devido à sua baixa rigidez.

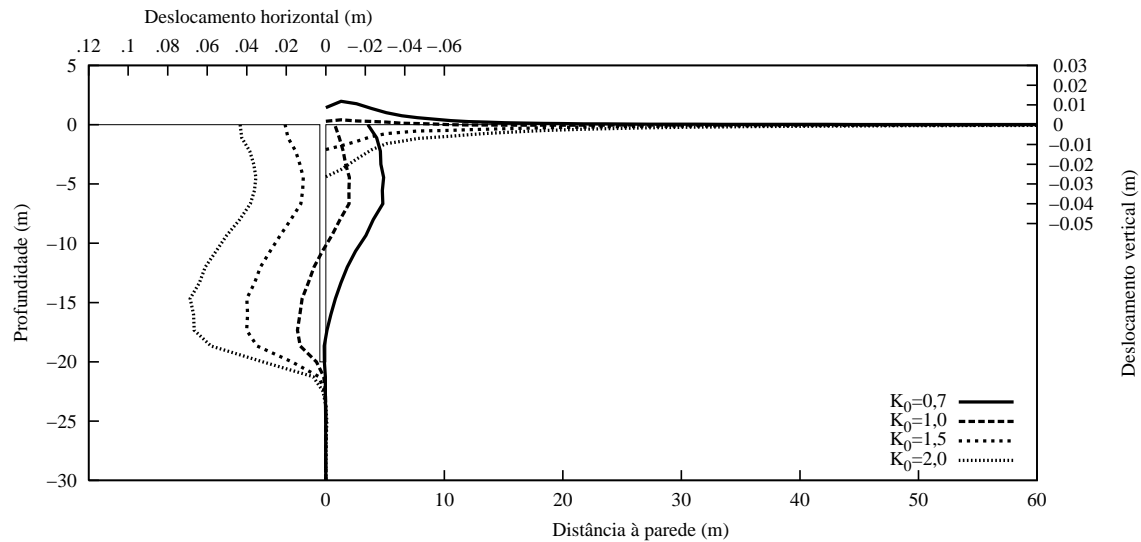
- Assim como no solo anteriormente estudado, a deformação do maciço aumenta à medida a que se aumentam as tensões iniciais no mesmo.
- O topo da face da vala sofre maior deslocamento horizontal em relação à restante altura da vala, durante a escavação da mesma, o que origina que a concavidade da face da vala seja menor que a do Solo 1 para a mesma fase.
- Também os assentamentos junto ao topo da vala são mais pronunciados. No entanto a distância a que estes se consideram razoáveis é idêntica, rondando os 20 m medidos na perpendicular desde o topo da vala
- O solo que apresenta maiores deslocamentos tem $K_0 = 2,0$, com $\delta h_{max} = 100$ mm, o que é um valor bastante grande considerando que a abertura da vala tem apenas 400 mm, e que a deformação da sua parede pode ir até 1/4 da sua espessura.
- Quanto aos deslocamentos verticais na 1ª fase, tomam em todos os casos o sentido descendente (assentamentos), registando-se o maior também no caso em que $K_0 = 2,0$, com $\delta v_{max} = 39$ mm registado no topo da vala (Figura 5.13(a)).
- À medida que a betonagem da parede avança, o solo recua sobre o maciço. Esta fase, ilustrada na Figura 5.13(b), é aparentemente mais desfavorável para o caso em que o

solo tem menores tensões iniciais, pois tanto o valor do deslocamento horizontal como vertical são maiores nesta fase. No caso do solo em que $K_0 = 0,5$ prevê-se empolamento à superfície com um valor máximo de 12 mm e um recuo da face da vala na ordem de 29 mm, valores estes superiores aos registados na fase anterior, mas no sentido contrário.

- Para o caso do solo com $K_0 = 2,0$ observa-se que o topo da vala tende a recuar, no entanto na zona inferior desta o recuo já não é tão pronunciado, verificando-se mesmo que o valor do δh_{max} reduz-se em apenas em 30% do previsto na fase de escavação. O mesmo acontece com o valor registado do δv_{max} .



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



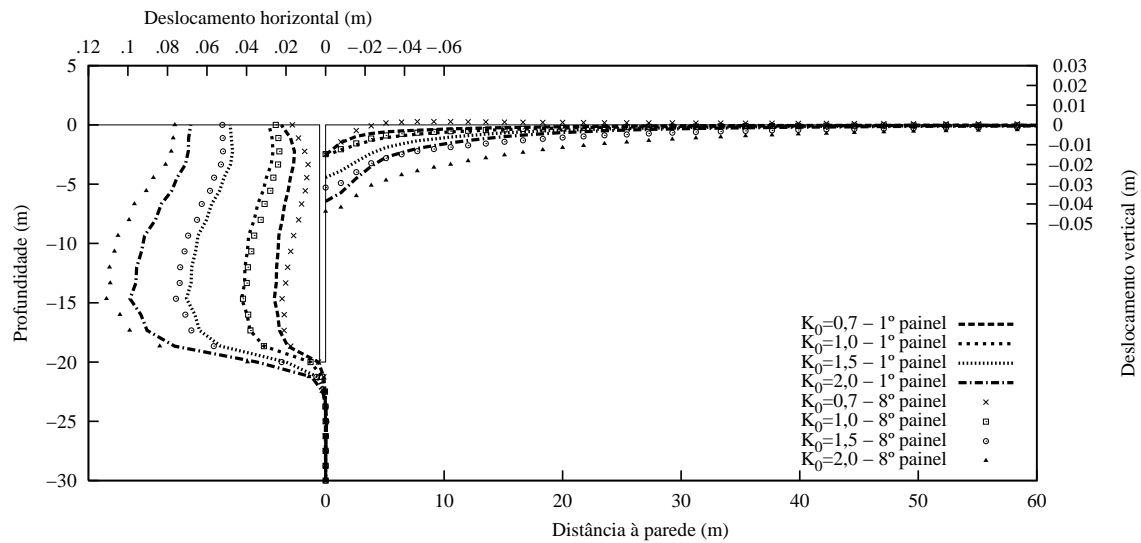
(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.13: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 2.

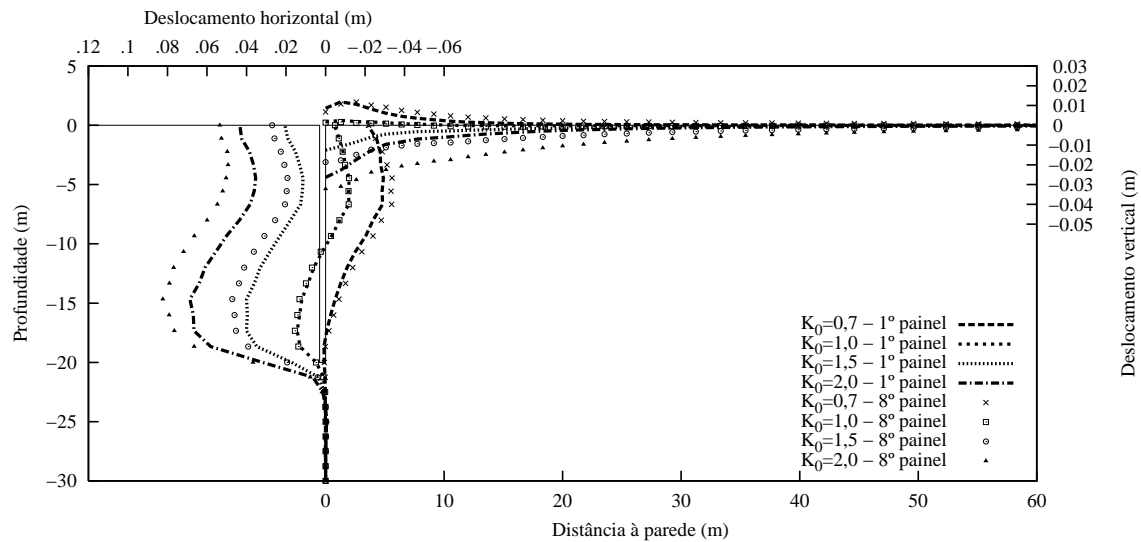
Quando se dá a construção do último painel da parede, a deformada que se poderá

esperar está representada nas Figuras 5.14(a) e 5.14(b), para os vários casos em estudo do Solo 2.

Assim como no Solo 1, é evidente que os solos com maiores tensões iniciais aumentam os seus deslocamentos, de forma geral, durante o processo construtivo da parede. Para os solos com tensões iniciais mais baixas, os seus deslocamentos também aumentam, mas no sentido contrário, os horizontais no sentido do maciço e os verticais no sentido ascendente. Os deslocamentos verticais tornam-se mais pronunciados ao longo da superfície do maciço, durante a construção deste último painel.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.14: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro e último painéis da parede, para o Solo 2.

A deformação do maciço constituído pelo Solo 2, com $K_0 = 0,7$ e $K_0 = 2,0$, é ilustrada nas Figuras 5.15 a 5.18.

O comportamento do Solo 2 com tensões iniciais baixas ($K_0 = 0,7$) é idêntico ao do Solo 1 para a mesma situação. A face frontal da vala desloca-se para o interior da zona escavada com um deslocamento máximo localizado na zona inferior da sua face. No final da construção dos 8 painéis verifica-se que o solo no tardo da parede mantém os deslocamentos sofridos devido à aplicação das pressões do betão na vala (Figura 5.15(d)).

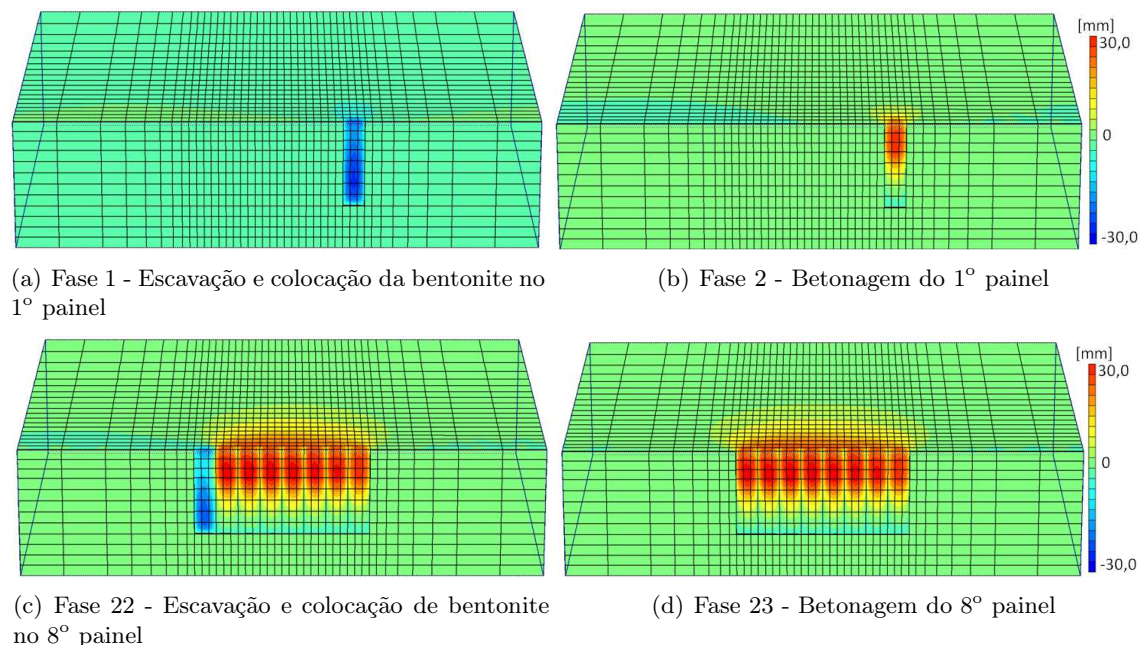


Figura 5.15: Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 0,7$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.

Para o Solo 2 com tensões iniciais mais elevadas ($K_0 = 2,0$) os deslocamentos dx na face frontal da vala são no sentido do interior da vala, em ambas as fases de instalação dos painéis, escavação e betonagem, com valores máximos de dx de ambas as fases localizados na zona inferior da vala. Neste caso, no final da construção da parede, verifica-se que a fase de escavação dos painéis foi a mais influente para os deslocamentos finais do solo no tardo da parede.

Embora ambos os casos mostrem resultados que se assemelham ao verificado para o Solo 1, em termos de valores absolutos o Solo 2 apresenta deformações muito superiores às verificadas no Solo 1, tanto para os deslocamentos horizontais dx (Figuras 5.15 e 5.16) como para os deslocamentos verticais dy (Figuras 5.17 e 5.18).

Os deslocamentos totais sofridos pelo Solo 2, ilustrados na Figura 5.19 para os 4 casos de diferentes tensões iniciais, mostram o comportamento deste solo face à instalação de uma parede moldada.

Em comparação com a Figura 5.9, em que se ilustram os resultados obtidos no Solo 1 verifica-se em particular que, os deslocamentos das faces laterais da parede moldada são bastante mais pronunciados que os verificados no Solo 1. Principalmente para o solo com $K_0 = 0,7$, com grandes deslocamentos para o interior do maciço, e para o solo com $K_0 = 2,0$,

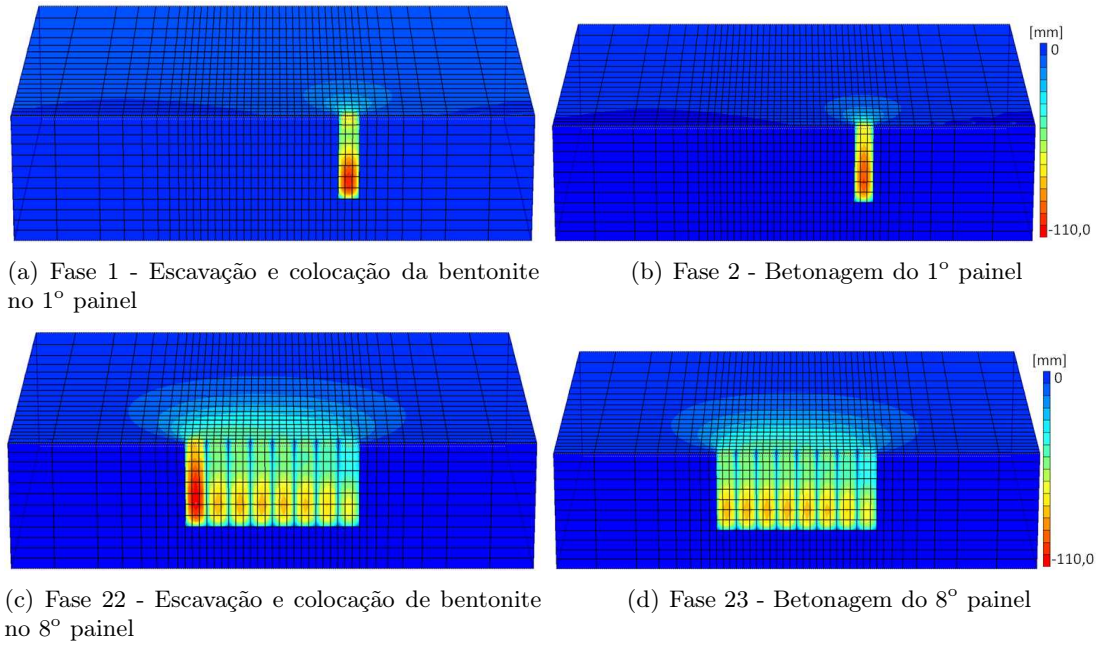


Figura 5.16: Desenvolvimento deslocamentos horizontais dx no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.

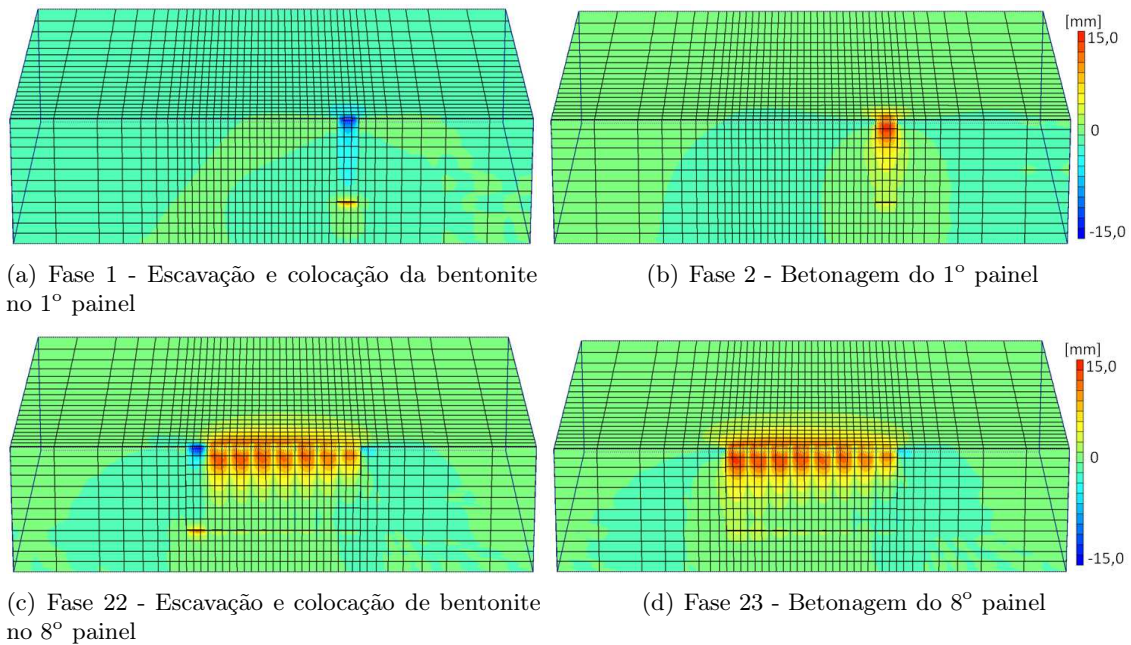


Figura 5.17: Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 0,7$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.

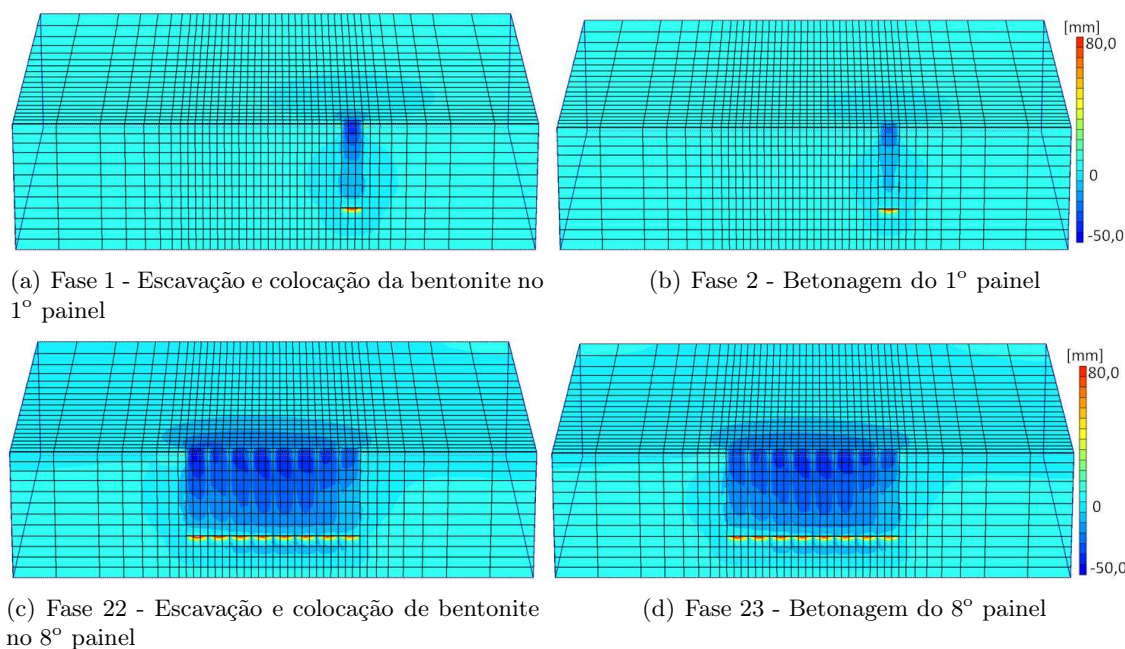


Figura 5.18: Desenvolvimento deslocamentos verticais dy no maciço com $K_0 = 2,0$, durante o processo construtivo da parede moldada, para o Solo 2.

com deslocamentos das faces laterais para o interior da vala.

Na modelação bidimensional do estudo paramétrico das tensões iniciais do maciço apenas foi possível calcular o problema para os casos em que o solo tinha atribuído $K_0 = 2,0$, $1,5$ e $1,0$. Ambos os casos em que $K_0 = 0,5$ e $0,7$ o cálculo não convergiu. De modo que, nas Figuras 5.20(a) a 5.22(b), se pode observar o comportamento dos primeiros três casos para as fases de escavação e betonagem da vala. Na primeira fase, o modelo $2D$ apresenta uma forma bastante mais côncava que os correspondentes cálculos em $3D$. Os deslocamentos, horizontais e verticais, são 5 a 6 vezes maiores que os previstos no estudo tridimensional. Na primeira fase, de escavação e colocação das lamas bentoníticas, ambos os casos se deformam para o interior da vala assim como a superfície sofre assentamentos consideráveis. Na segunda fase, em que se betona a vala, ambos os casos sofrem um recuo dos deslocamentos horizontais e verticais, sendo que no caso em que se admitem menores tensões iniciais ($K_0 = 1,0$) esse recuo se verifica em empolamento da superfície do maciço. Verifica-se que os assentamentos tomam valores consideráveis até 60 m de distância à vala escavada.

5.3.3 Conclusões

O estudo feito nesta secção permitiu concluir que:

- Quanto maiores forem as tensões iniciais instaladas no maciço, maiores serão os deslocamentos horizontais para o interior da vala, assim como os assentamentos à superfície do terreno, na 1ª fase de construção do painel;
- Para tensões iniciais menores são espectáveis alguns empolamentos e deslocamentos

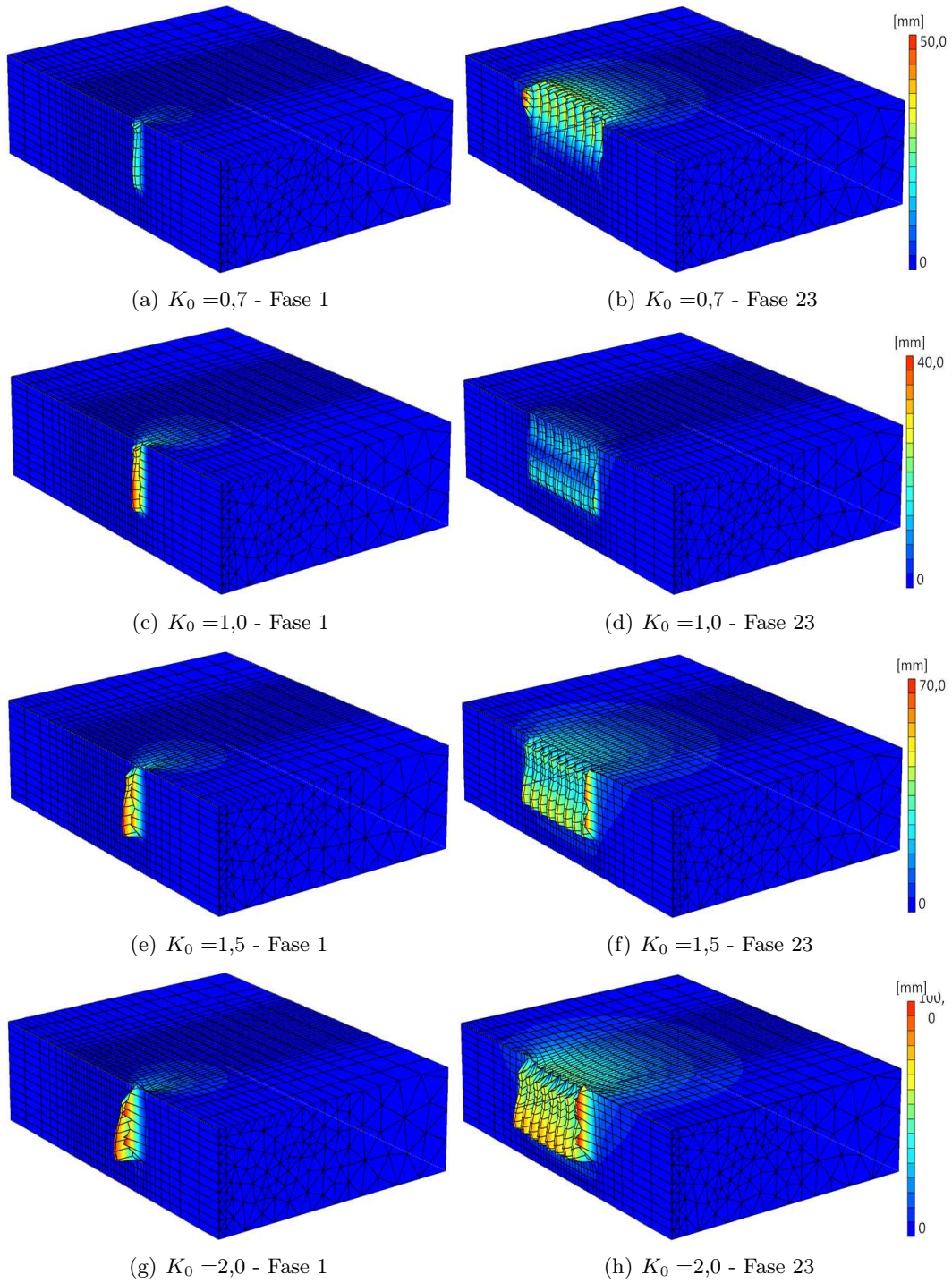
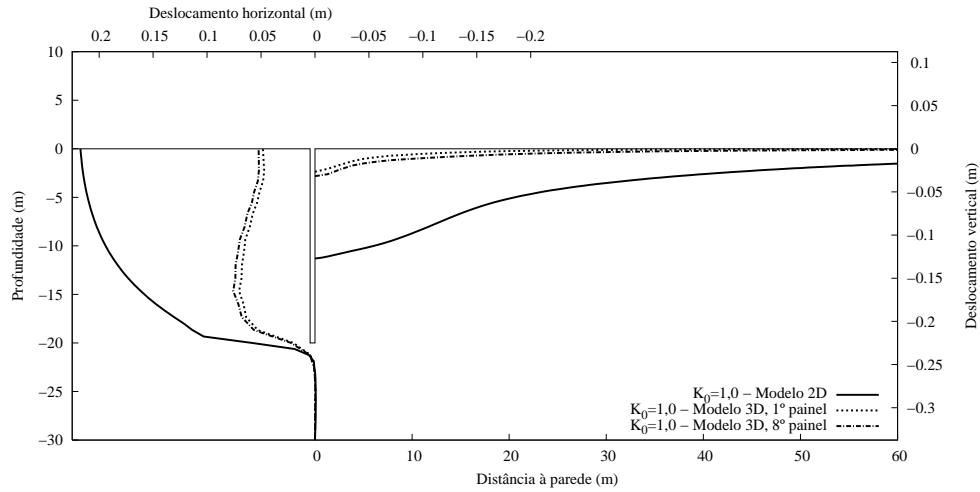
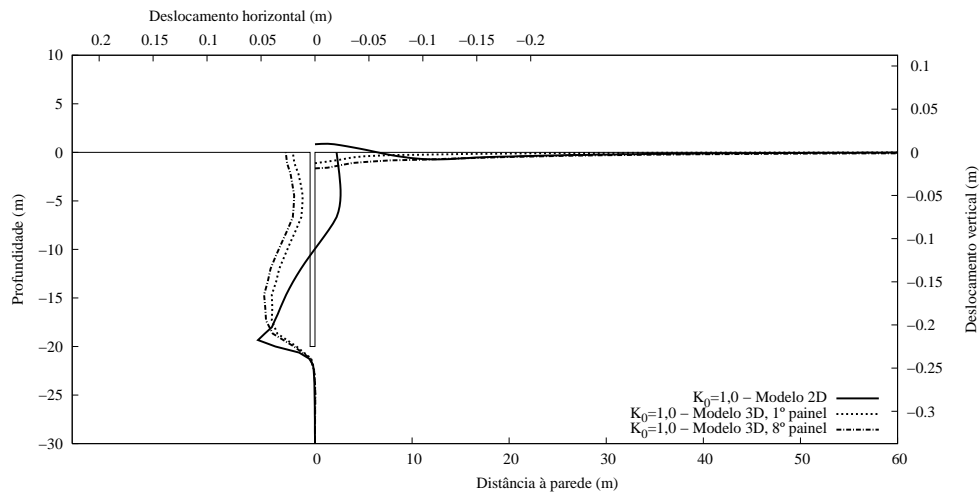


Figura 5.19: Desenvolvimento deslocamentos totais no Solo 2, no início (Fase 1, à esquerda, escavação e colocação da bentonite no 1º painel) e no final (Fase 23, à direita, betonagem do 8º painel) do processo construtivo da parede moldada, para os diferentes valores de K_0 .

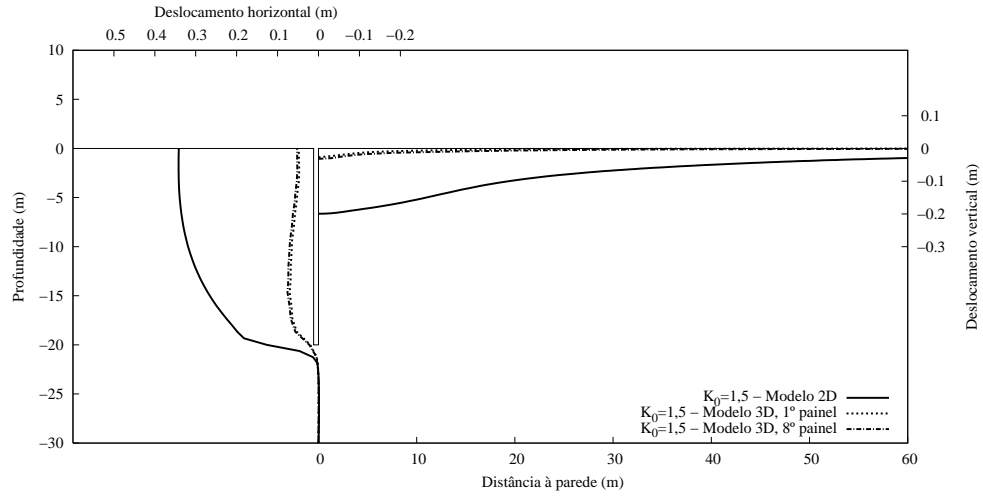


(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

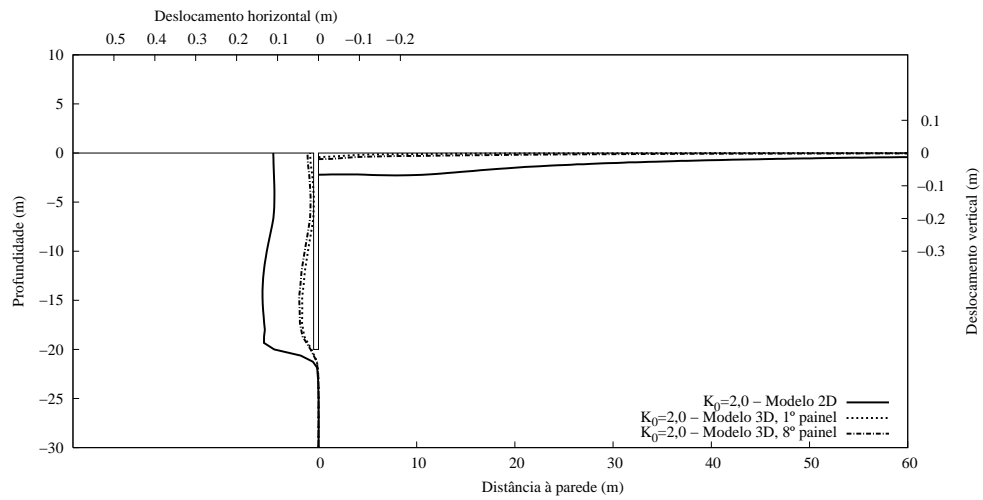


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.20: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0 = 1,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.

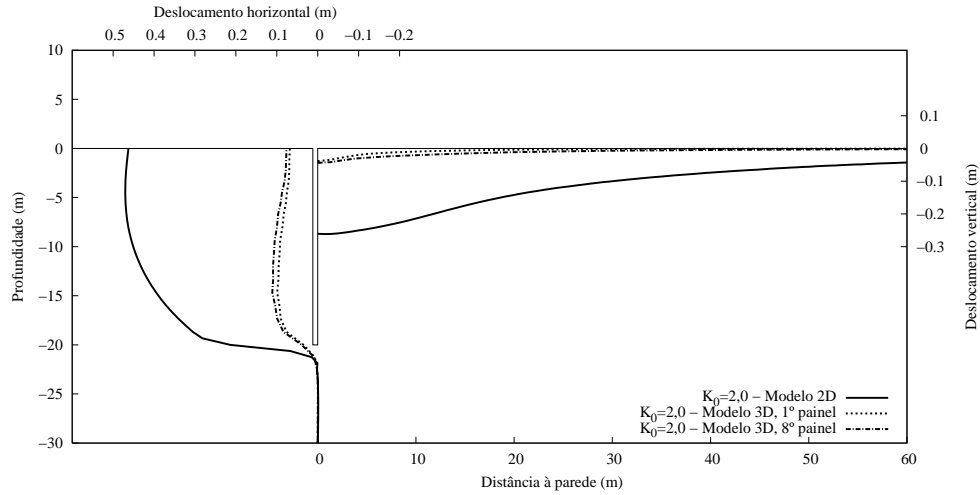


(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

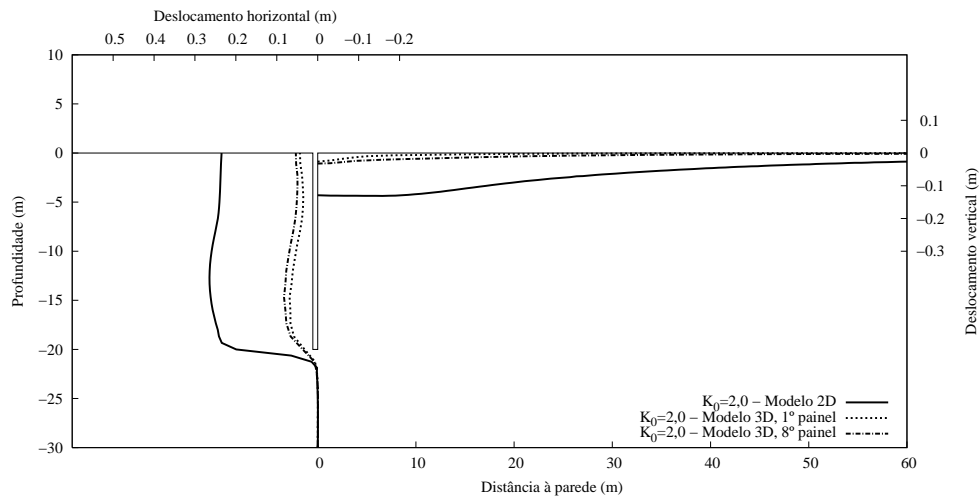


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.21: Deslocamento horizontal do solo no tardoz da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0 = 1,5$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.22: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação da parede, para o Solo 2 com $K_0=2,0$ - comparação do modelo 3D com o modelo 2D.

horizontais para dentro do maciço;

- Para o caso de solos com K_0 elevado, à medida que se vão construindo os sucessivos painéis da parede moldada, vão aumentando os deslocamentos horizontais para o interior da vala e os assentamentos;
- Pode-se concluir também que, para os maciços com baixas tensões iniciais, a fase mais desfavorável é a da betonagem, enquanto que para os restantes é a da escavação da vala e colocação das lamias bentoníticas.
- Em geral, as tensões instaladas no solo inicialmente influenciam consideravelmente o resultado dos deslocamentos devido à instalação de uma parede moldada. Quanto maiores as tensões iniciais, maior será o alívio do solo e consequente deformação durante a escavação da vala. No entanto, quanto menores forem as tensões iniciais, maior será a deformação do maciço na fase de betonagem, devido à diferença entre as tensões instaladas e as aplicadas pelo betão na vala.

5.4 Influência da largura da parede

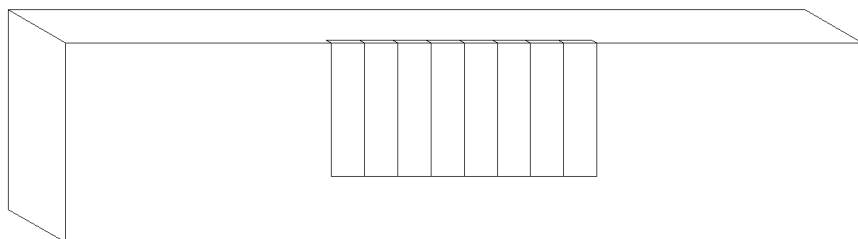
5.4.1 Solo 1, com $K_0 = 1,5$

Para se estudar a influência da largura do painel de parede moldada consideraram-se 4 modelos tridimensionais, representados na Figura 5.23, constituídos por painéis de 5, 10, 20 e 40 m. Deste modo, o modelo em que os painéis têm 5 metros de largura corresponde ao anteriormente apresentado, pelo que o comprimento total de 40 m de parede, é atingido pela construção de 8 painéis com aquela largura. No caso dos painéis com 10 m de largura a parede é, assim, modelada com 4 painéis, no caso dos painéis de 20 m com 2 e com 40 m com 1. Faz-se ainda notar que 5 m corresponde à largura corrente de um painel de parede moldada, com variação mais ou menos de 1 m, sendo o comprimento de 10 m um limite superior do que é adoptado na prática. Os casos de 20 a 40 m são, assim, hipóteses académicas que visam estimar o comportamento do maciço.

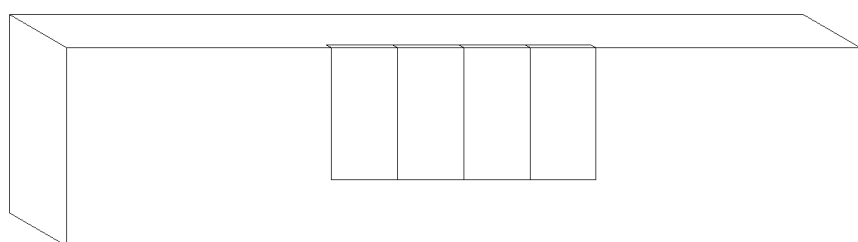
A instalação da parede faz-se igualmente como descrito anteriormente, com a remoção do solo da vala e colocação das pressões da bentonite, seguido da aplicação das pressões do betão fresco e da fase de cura do betão.

Deslocamentos horizontais do solo e assentamentos na superfície do maciço

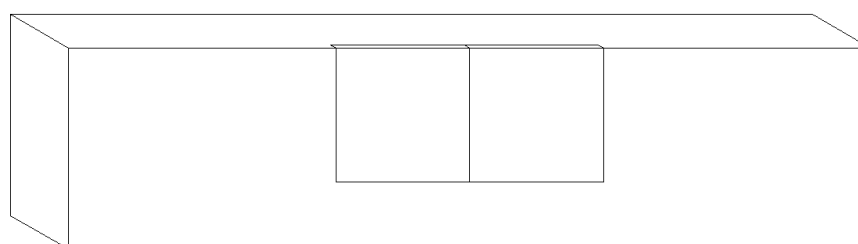
A Figura 5.24 apresenta os deslocamentos horizontais da face da vala e os assentamentos da superfície do terreno para as fases de escavação e colocação da bentonite e do betão fresco na instalação do primeiro painel de cada modelo. Comparam-se os resultados do Solo 1, deslocamentos horizontais e verticais, com os resultados obtidos na modelação bidimensional do mesmo problema, considerando aqui que a parede tem largura infinita:



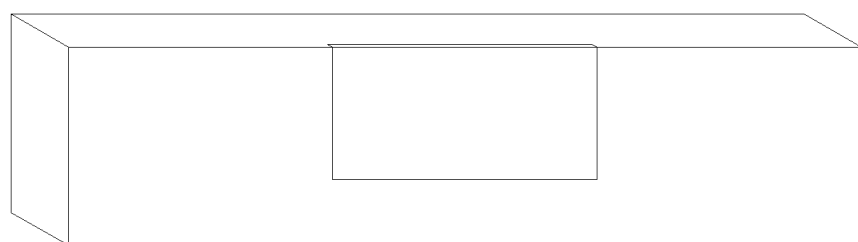
(a) Parede de 40 m constituída por 8 painéis de 5 m ($L=5$ m).



(b) Parede de 40 m constituída por 4 painéis de 10 m ($L=10$ m).



(c) Parede de 40 m constituída por 2 painéis de 20 m ($L=20$ m).



(d) Parede de 40 m constituída por um único painel ($L=40$ m).

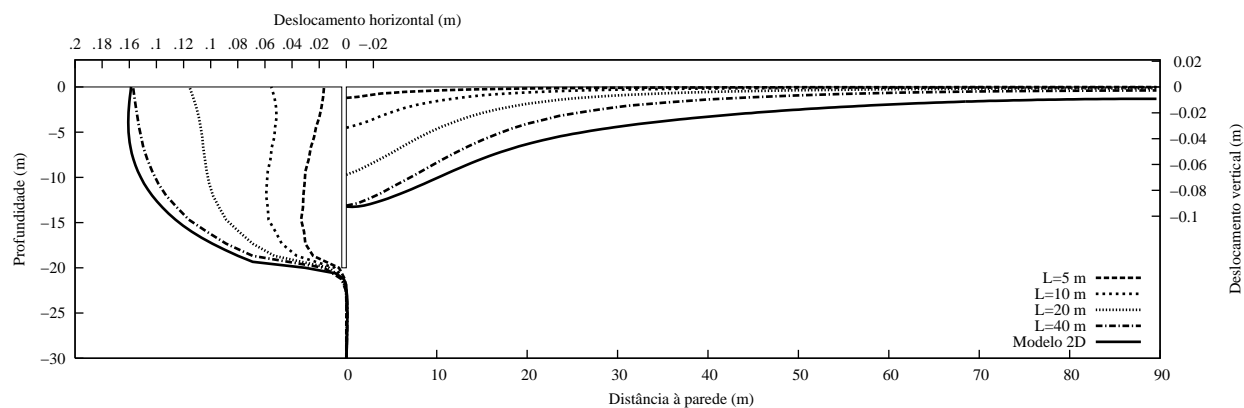
Figura 5.23: Quatro modelos de estudo da influência da largura do painel para a construção de uma parede moldada num maciço constituído pelo Solo 1.

- Os deslocamentos do Solo 1 evoluem linearmente à medida que aumenta a largura do painel betonado.
- A diferença dos deslocamentos entre os 5 modelos calculados é maior na fase de escavação da vala do que na fase de betonagem.
- É possível observar que, o modelo com $L = 40$ m, o comportamento do solo é bastante próximo ao previsto no modelo 2D.
- A distância a que os assentamentos à superfície do maciço, que tomam valores consideráveis aumenta, com o aumento da largura do painel instalado. Este facto verifica-se em ambas as fases, com maior incidência na primeira. Deve-se ao facto de quanto maior foi o painel maior será o volume de solo mobilizado, provocando assentamentos até uma distância maior.

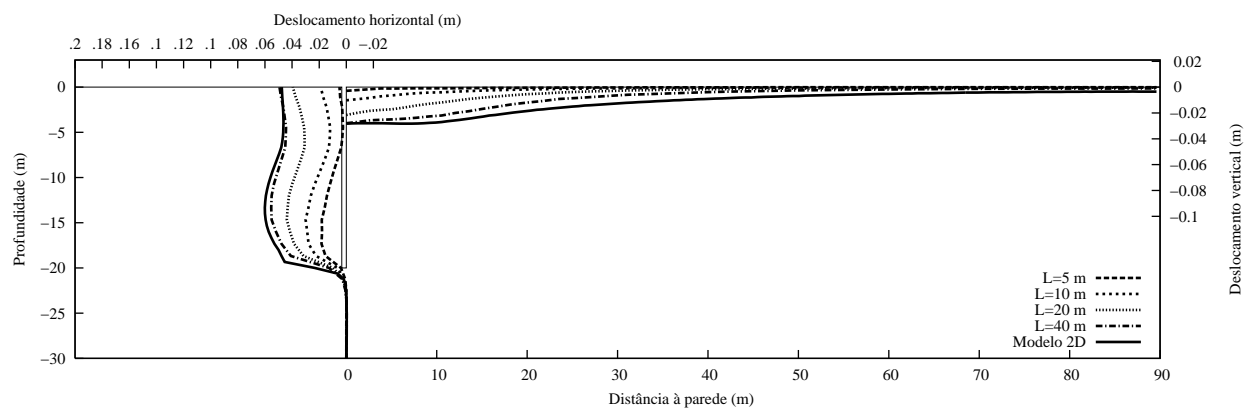
Analisa-se agora mais em pormenor a evolução dos deslocamentos do maciço durante a instalação da parede, comparando os 4 modelos tridimensionais calculados, nas Figuras 5.25 a 5.30.

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os resultados dos deslocamentos horizontais, dx , na primeira e última fases da instalação da parede, ou seja, a escavação do primeiro painel e na betonagem do último painel de cada parede, respectivamente:

- O deslocamento máximo em cada modelo dá-se no meio da face da vala escavada, aproximadamente a $1/3$ da altura da vala. Este deslocamento máximo, dx , verifica-se na fase de escavação da vala.
- À medida que aumenta a largura do painel aumentam os deslocamentos horizontais (dx) em toda a largura da vala escavada. Este deslocamento verificam-se em menor valor nos bordos da vala.
- No final da construção, os deslocamentos dx são menores, pois os painéis já se encontram todos betonados e o solo recupera parte da sua deformação da primeira fase.
- Na parede frontal da vala a diferença dos deslocamentos dx entre os 4 modelos é maior na primeira fase (Figura 5.25) do que na última fase da instalação (Figura 5.26).
- À superfície do maciço estes deslocamentos abrangem uma área tão grande quanto a largura do painel, durante a fase de construção do primeiro painel. O mesmo se verifica na última fase de construção da parede, no entanto, a variação entre os modelos é muito menor, pois encontrando-se a parede já totalmente instalada, o solo mostra a sua deformada final.
- O aumento da largura do painel faz com que se escave maior volume de solo, dando origem a uma maior redistribuição de tensões e consequente deformação.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.24: Deslocamento horizontal (dx) do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 1.

- As tensões instaladas anteriormente são desviadas para a zona inferior da vala, assim como para os lados desta (horizontalmente). Este processo de transferência de carga está directamente relacionado com a deformação do maciço.
- No final da construção dos painéis os maciços apresentam as deformadas da Figura 5.26. Como para os 4 modelos do Solo 1 se aplicou sempre $K_0 = 1,5$, esta fase apresenta menores deformações dx , que na fase de escavação dos painéis.
- A Figura 5.26 mostra também que a deformada final de cada painel é a que resulta da fase de betonagem, e que o solo no tardo do último painel construído, em cada modelo, fica sempre um pouco mais deformado do que os primeiros a ser instalados.

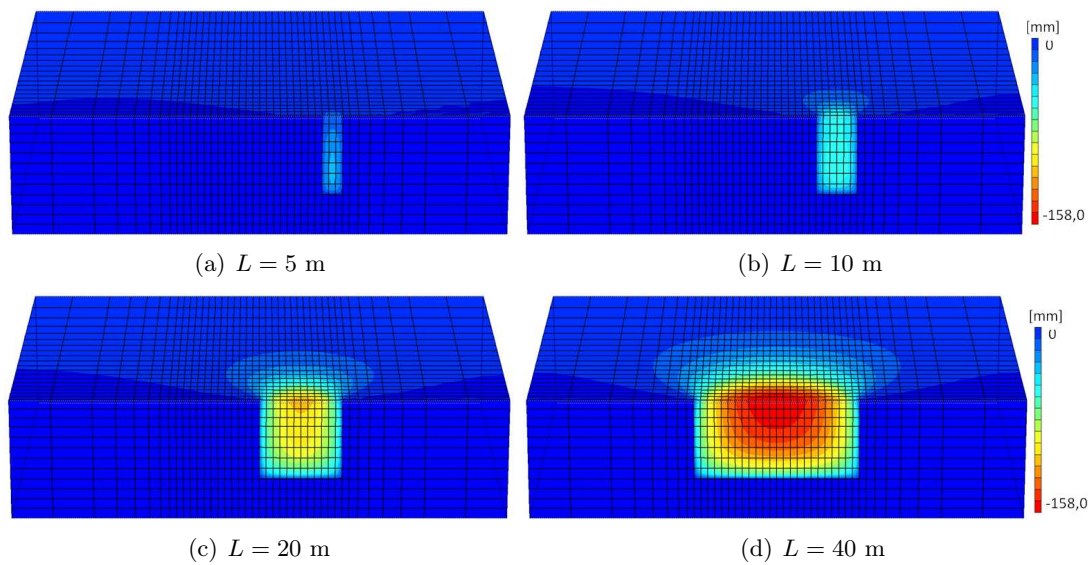


Figura 5.25: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

Os deslocamentos verticais (assentamentos, neste caso) dy ao longo do processo construtivo da parede moldada, em cada modelo, são apresentadas nas Figuras 5.27 e 5.28, onde se pode observar que:

- O modelo em que a largura do painel é de 5 m não apresenta resultados significativos comparativamente aos restantes modelos na instalação do primeiro painel da parede, durante a escavação da 1ª vala (Figura 5.27).
- À medida que aumenta a largura do painel aumentam os valores dos deslocamentos verticais na superfície do maciço, assim como a área superficial que estes abrangem. Estes deslocamentos aumentam devido à descompressão do solo no tardo do painel.
- Quando se passa para a última fase de construção da parede, o solo já se encontra consideravelmente alterado, pelo que, a variação dos assentamento à superfície entre os quatro modelos é bem menor.

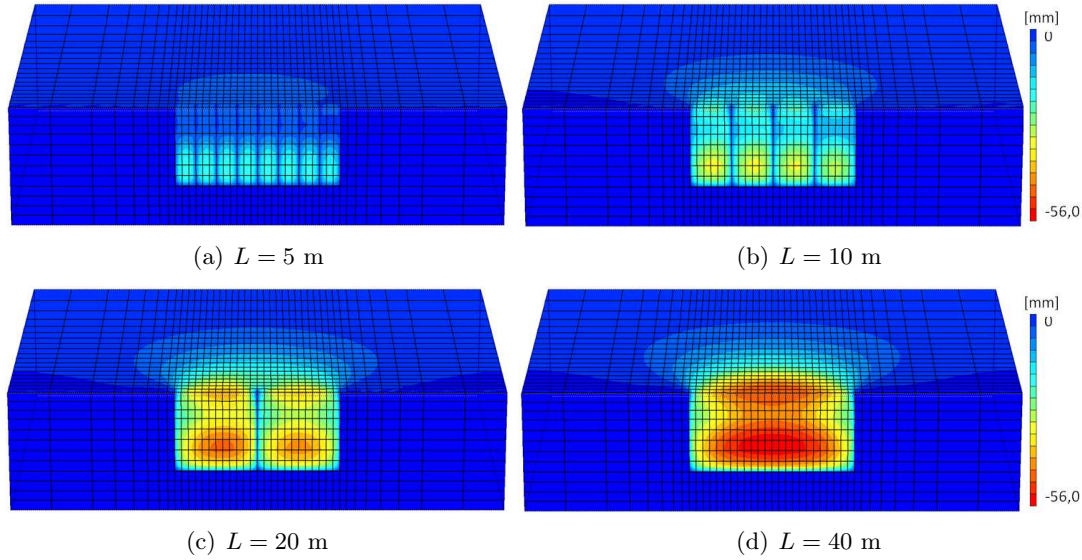


Figura 5.26: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

- No final da construção o solo no tardo do primeiro painel instalado apresenta sempre menores assentamentos.
- O assentamento máximo, nestes modelos, dá-se na zona central do maciço mais próxima do topo da vala. Este ponto tem menor resistência porque se encontra longe do fundo e dos extremos laterais da vala, tendo por isso maior necessidade de distribuir a sua tensão o que leva a que sofra maior deformação.
- Na fase final da instalação da parede (5.28) a superfície do maciço apresenta um bolbo de assentamentos com uma área tão grande quanto a largura dos painéis instalados. Os maiores assentamentos situam-se na zona mais próxima do último painel construído.
- A área da superfície do maciço afectada no final da construção é tão grande quanto a largura do painel. Para o modelo com $L = 5$ m poderá ir até uma distância perpendicular de 20 m, no modelo $L = 10$ m até 35 m, para $L = 20$ m vai até 50 m, e no modelo com o maior painel, $L = 40$ m, os assentamentos à superfície vão até 60 m de distância ao topo da vala.

Os deslocamentos horizontais dz apresentam valores inferiores aos deslocamentos anteriormente analisados, em todos os modelos calculados. As Figuras 5.29 e 5.30 mostram que:

- Estes deslocamentos localizam-se principalmente nos cantos das faces das valas escavadas e na superfície do terreno, em ambas as fases construtivas.
- Na primeira fase (Figura 5.29) os deslocamentos dz do maciço do Solo 1 apenas mostram valores consideráveis nos modelos em que a parede tem largura de 20 e 40 m, comparativamente aos restantes que não apresentam deformação significativa.

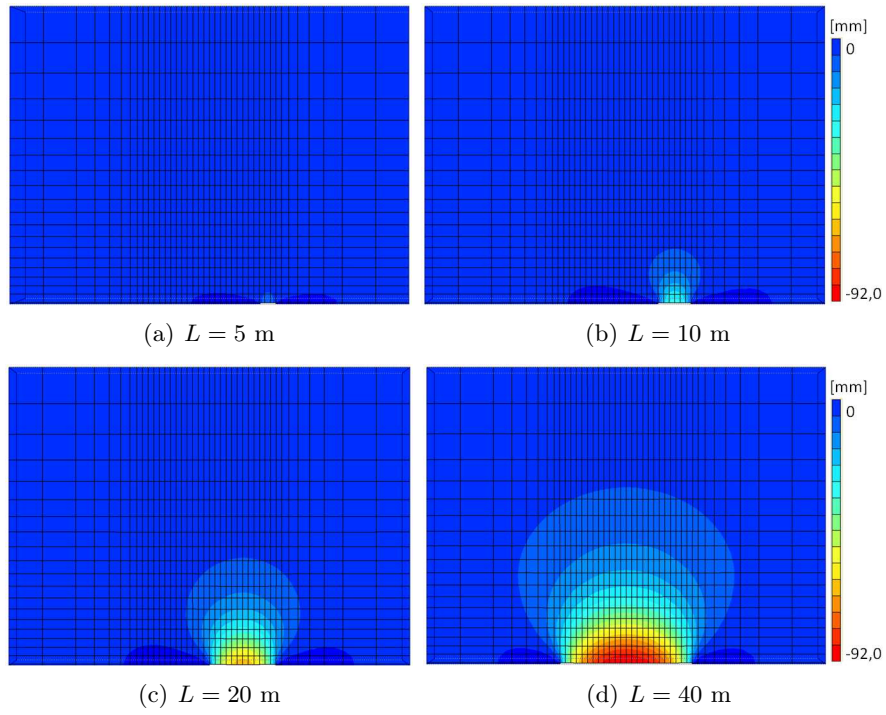


Figura 5.27: Assentamento na superfície do maciço durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

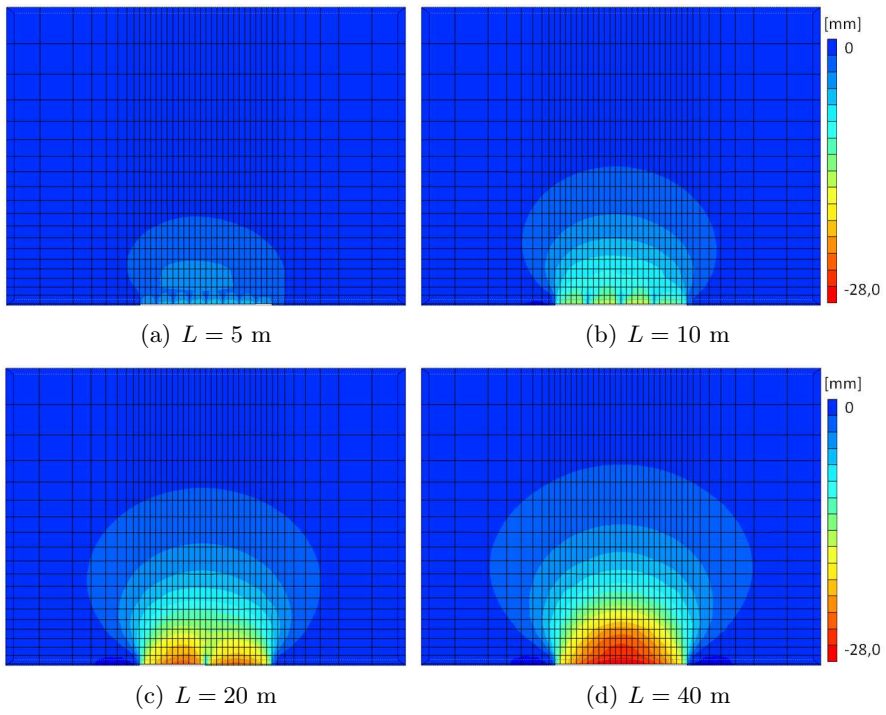


Figura 5.28: Assentamento na superfície do maciço no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

- A maior área de deslocamentos nesta direcção situa-se na superfície do maciço, no entanto os seus valores máximos nas faces laterais da vala.
- Como é possível observar pela escala de cores, a deformação do maciço na direcção do Z é simétrica em relação ao eixo vertical do centro do maciço. De cada canto da vala os deslocamentos tomam sentidos opostos, sendo que ambas as faces laterais da vala se deslocam para o interior da vala.
- Este deslocamento é provocado nas faces laterais da vala quando se dá o alívio das tensões resultante da escavação. À medida que se avança na construção da parede os deslocamentos dz aumentam, devido à continuação de remoção do solo. E quanto maior for a parede, maiores serão os deslocamentos.
- Na última fase do processo construtivo os quatro modelos apresentam valores de deslocamentos horizontais dz muito próximos.

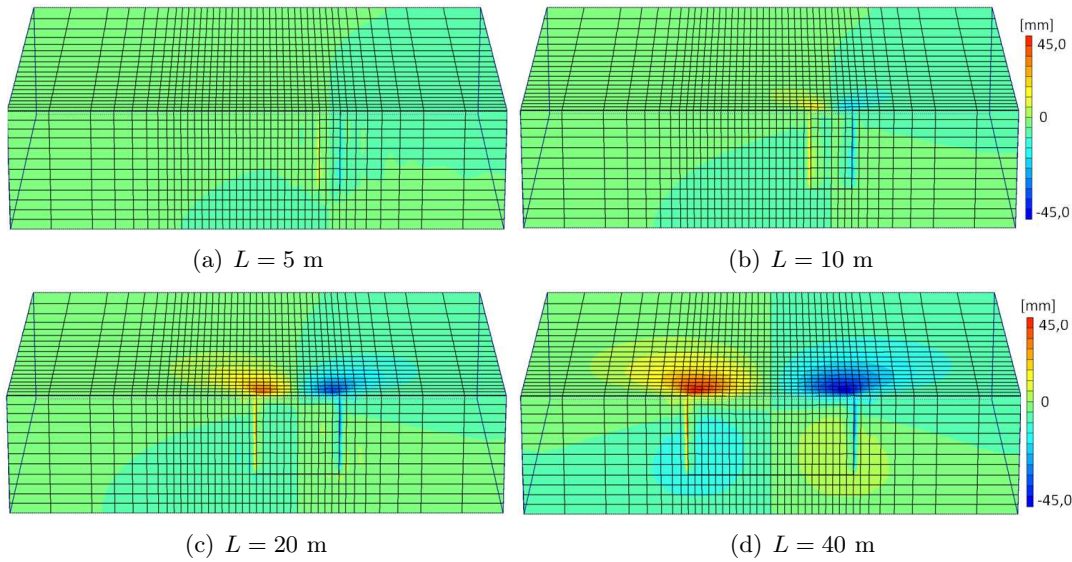


Figura 5.29: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

5.4.2 Solo 2 com $K_0=0,7$

Apresenta-se nesta secção um estudo idêntico ao da secção anterior, aplicado a um maciço constituído pelo Solo 2 com características enunciadas na secção 5.2. Os modelos calculados são os apresentados na Figura 5.31, em que se tem quatro modelos em que a largura da parede toma valores de 4, 5, 6 e 10 m. Face à baixa rigidez deste solo não foi possível obter um calculo comparativo em modelo bidimensional, em que se consideraria uma parede de largura infinita.

O processo construtivo da instalação da parede moldada, em cada modelo, é o mesmo utilizado na secção anterior.

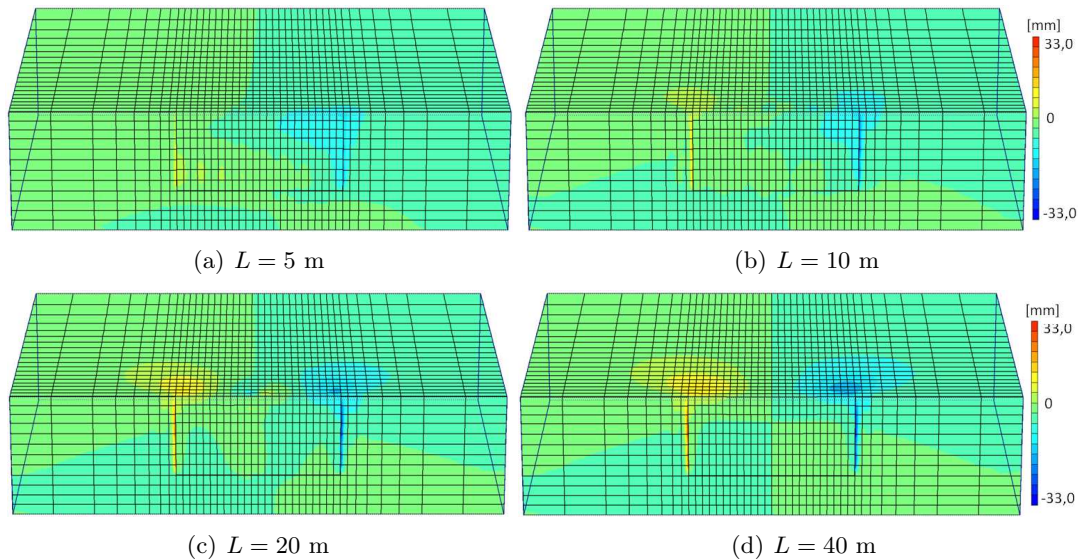
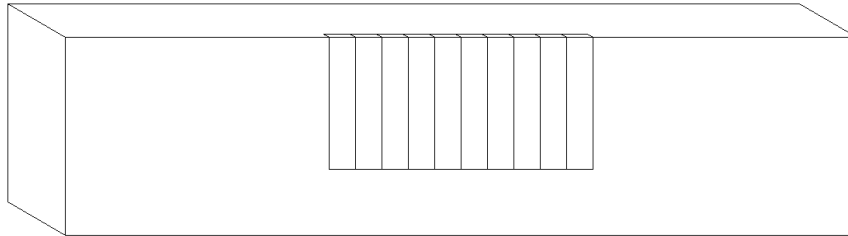


Figura 5.30: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 1.

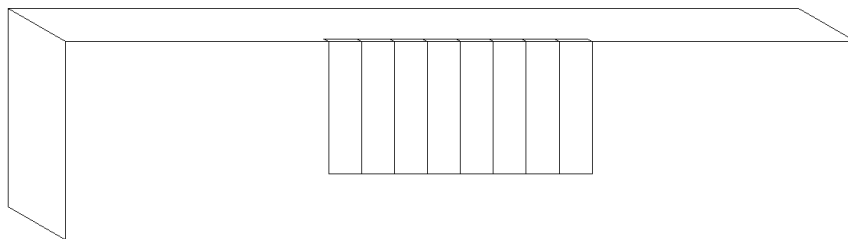
Deslocamentos horizontais do solo e assentamentos na superfície do maciço

As Figuras 5.32(a) e 5.32(b) apresentam os resultados dos deslocamentos horizontais e verticais para as fases de betonite e betonagem, respectivamente. A partir destas pode-se observar que:

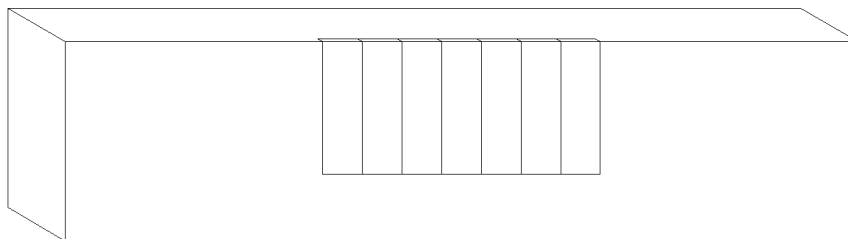
- Comparativamente aos deslocamentos sofridos pelo Solo 1 nestas mesmas fases, o Solo 2 apresenta um cenário de deformação bastante mais agravado.
- Na primeira fase, em que se escava o solo do interior da vala e se aplicam as pressões respeitantes às lamas bentoníticas, este solo deforma-se para o interior da vala, provocando assentamentos na superfície do terreno, independentemente da largura da vala escavada. O que se verificava também no solo analisado anteriormente, mas com menores deformações.
- Na segunda fase, quando se dá a betonagem da vala por aplicação das pressões correspondentes ao betão em estado líquido, o solo reage no sentido contrário ao da primeira fase. A deformada avança sobre o maciço e verificam-se empolamentos à superfície do terreno, para os quatro modelos calculados. Nesta fase, o Solo 1 não se deformava neste sentido.
- Pode-se observar que em ambas as fases, embora a deformação seja maior que no Solo 1, a distância a que os assentamentos e empolamentos são consideráveis é apenas de 20 m, o que é bastante inferior ao observado no solo anterior. Verifica-se então que, a deformação vertical é maior, no entanto dá-se numa área menor, mais junto à vala escavada e betonada.



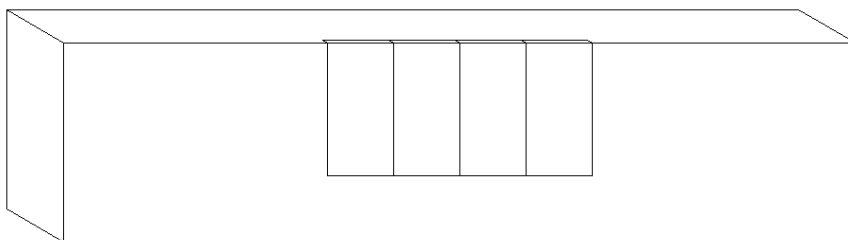
(a) Parede de 40 m constituída por 10 painéis de 4 m.



(b) Parede de 40 m constituída por 8 painéis de 5 m.



(c) Parede de 42 m constituída por 7 painéis de 6 m.



(d) Parede de 40 m constituída por 4 painéis de 10 m.

Figura 5.31: Quatro modelos de estudo da influência da largura do painel para a construção de uma parede moldada num maciço constituído pelo Solo 2.

- Comparando os quatro modelos entre si observa-se que o assentamento na primeira fase é sempre maior no ponto mais próximo da face da vala, tendendo a diminuir com o afastamento a esta. O seu valor depende linearmente da largura desta, sendo tanto maior quanto mais larga a vala for.
- Quanto ao deslocamento horizontal, na primeira fase, os modelos apresentam deformadas equivalentes para as larguras de 4, 5 e 6 m. No caso da vala com 10 m de largura, o solo apresenta uma deformação exagerada no topo da face da vala, comparativamente aos modelos com larguras inferiores.
- O deslocamento horizontal máximo na primeira fase dá-se no topo da parede para os modelos em que a valas têm largura de 6 e 10 m, enquanto que para os outros dois modelos o deslocamento máximo dá-se a meia altura da parede.
- Durante a fase de betonagem os quatro modelos apresentam comportamentos mais idênticos, sem diferenças significativas entre eles. No entanto, continua-se a verificar que o deslocamento horizontal e o empolamento à superfície aumentam com o aumento da largura da vala betonada.
- Nesta fase os deslocamentos horizontais máximos dão-se aproximadamente a meia altura da vala, em todos os modelos. Os empolamentos máximos à superfície do maciço localizam-se a uma distância média de 3 m medidos ao topo da vala.

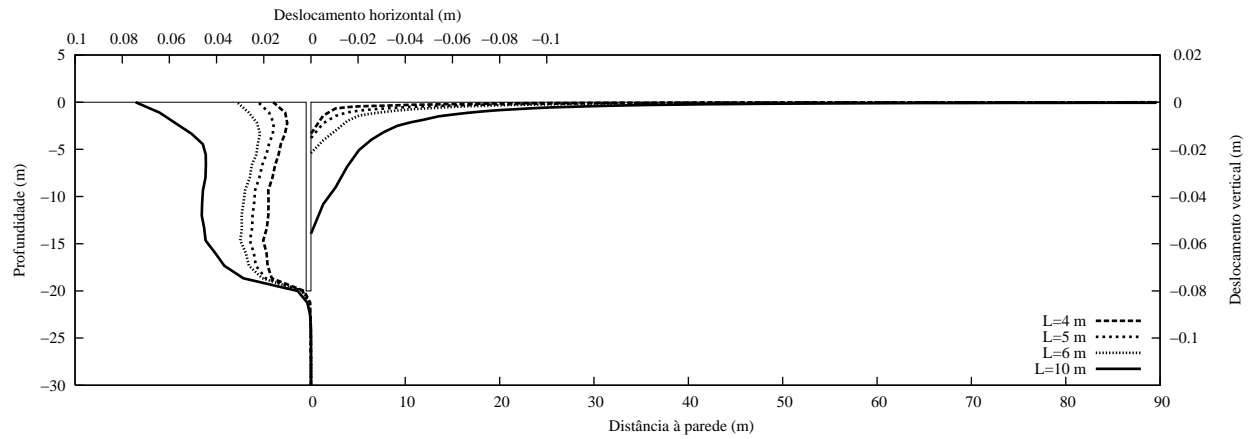
Considerando todo o faseamento da parede moldada em cada modelo calculado, analisa-se o campo dos deslocamentos horizontais dx . As Figuras 5.33 e 5.34 apresentam as previsões para a fase de escavação do primeiro painel e para a fase em que se betona o último painel da modelação em caso, respectivamente.

Pela Figura 5.34 pode-se observar que, na fase de escavação do primeiro painel dos modelos:

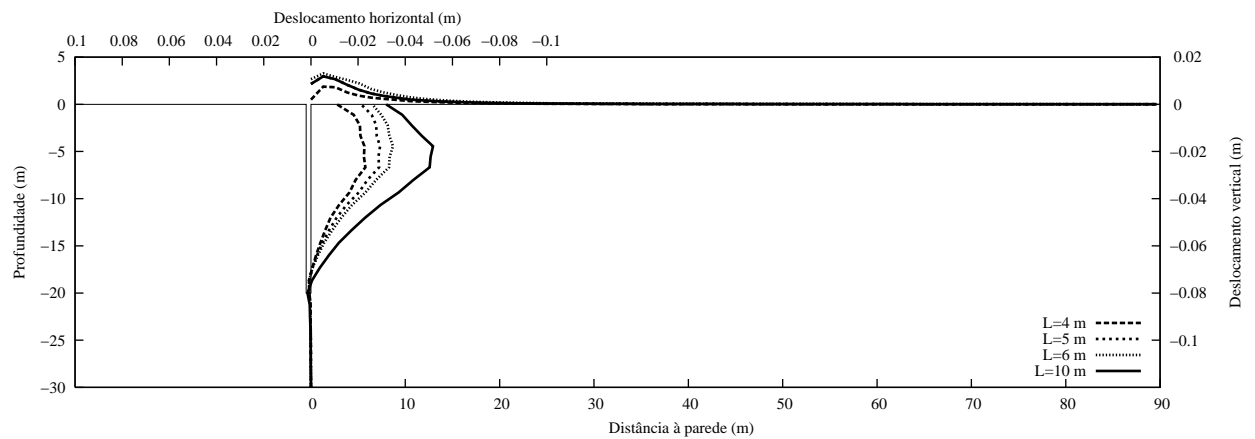
- Os deslocamentos dx dos modelos com 4, 5 e 6 m de largura têm a mesma ordem de valores, e que a sua deformada é de certo modo homogénea em toda a área da face da vala, à excepção dos bordos desta em que estes se anulam.
- Já no modelo com largura de 10 m o comportamento é bastante diferente. O centro da face da vala é a zona que sofre mais com a escavação e no topo desta verifica-se o deslocamento máximo dx .

Na fase em que se betona o último painel da modelação, prevê-se que:

- Os três primeiros modelos voltam a mostrar comportamentos idênticos, aumentando os deslocamentos linearmente com o aumento da largura do painel. Verifica-se que o deslocamento máximo se dá na zona central da face da vala e que na base desta os deslocamentos dx se aproximam de zero.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.32: Deslocamento horizontal (dx) do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do 1º painel da parede, para o Solo 2.

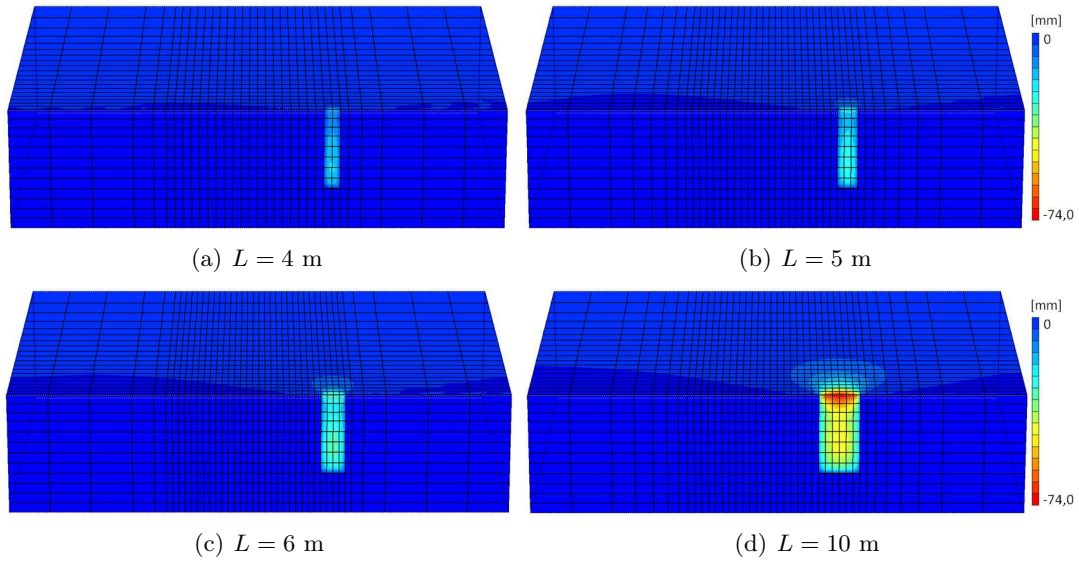


Figura 5.33: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

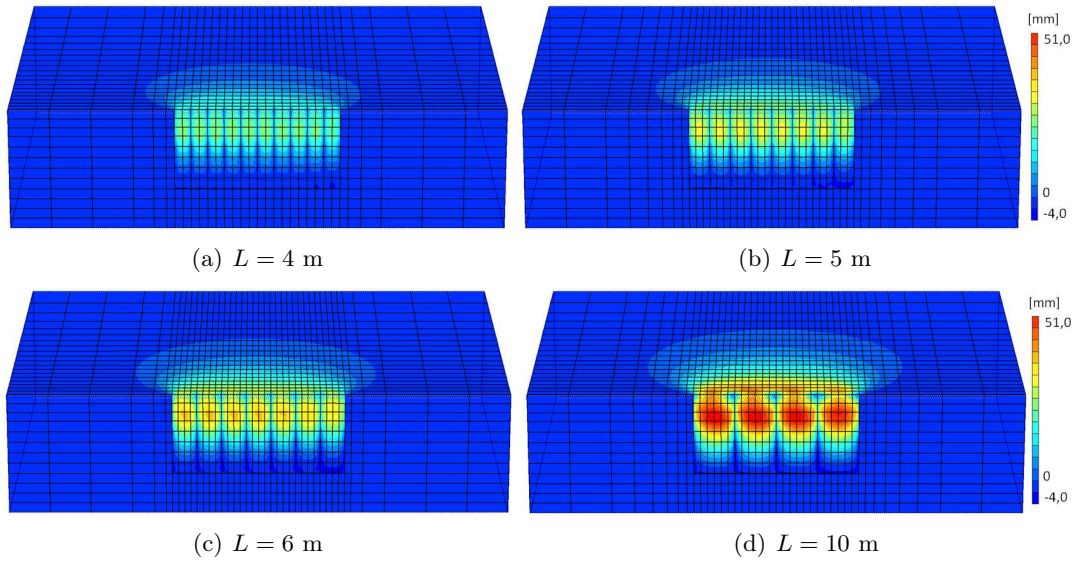


Figura 5.34: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do X , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

- O último modelo, em que a largura da vala é de 10 m, nesta fase, aproxima-se mais do comportamento dos modelos com larguras inferiores.
- Nos quatro modelos o topo da vala sofre um deslocamento dx considerável, verificando o mesmo no solo da superfície do maciço, onde se observa uma distância perpendicular influenciada com medida igual à altura da parede (20 m), no final da instalação de todos os painéis da parede moldada.

Quanto à reacção do solo à superfície do maciço, em termos de deslocamentos verticais (dy), as Figuras 5.35 e 5.36 mostram que:

- Na primeira fase, os assentamentos são pouco pronunciados nos primeiros três modelos calculados. No entanto, no modelo em que a vala tem 10 m de largura os assentamentos são muito superiores, com o seu máximo no topo da parede.
- O bolbo de assentamentos é pequeno, isto é, os assentamentos não se propagam significativamente ao longo da superfície do maciço.
- Na fase da betonagem do último painel a superfície do maciço apresenta uma grande área de empolamentos para os quatro modelos.
- A Figura 5.36 mostra que os maiores empolamentos, no final da construção, se verificam na zona do último painel instalado, independentemente do tamanho dos painéis.

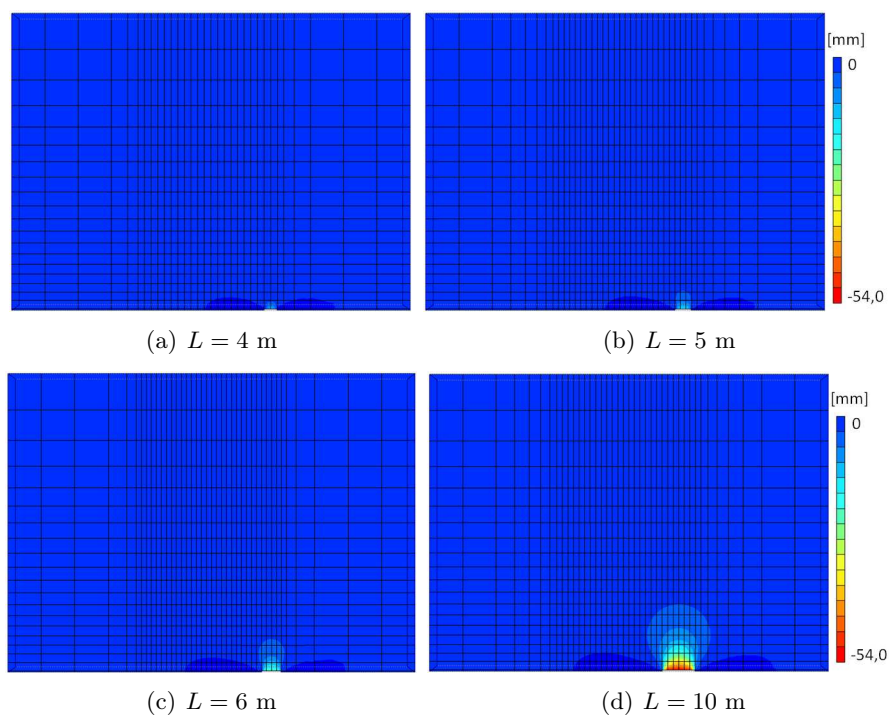


Figura 5.35: Assentamento na superfície do maciço durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

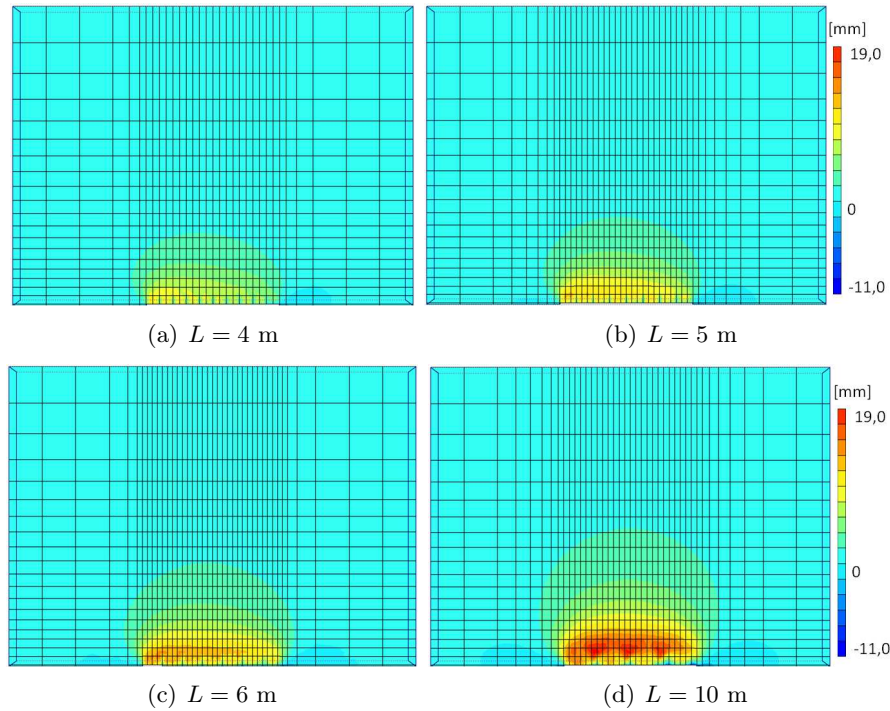


Figura 5.36: Assentamento na superfície do maciço no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

Em observação das Figuras 5.37 e 5.38, onde se vêem os resultados obtidos ao nível dos deslocamentos dz durante a instalação da parede moldada, verifica-se que, tanto no início da instalação da parede como no final da sua construção, estes deslocamentos são pouco significativos para os quatro modelos apresentados. O modelo com maior largura de painel apresenta maiores deslocamentos dz do que o restante três modelos, nomeadamente nas faces laterais da vala, onde se verifica o deslocamento dz máximo. No entanto, em relação à restante parte do maciço verifica-se que existe pouca influência da largura dos painéis para o Solo 2 ao nível dos deslocamentos horizontais dz .

5.4.3 Conclusões

Da análise anterior pode-se concluir que:

- Para o Solo 1, a fase de instalação da parede mais desfavorável é a primeira, em que se escava o solo da vala, pois apresenta deslocamentos horizontais e assentamentos superiores aos calculados para a fase seguinte, independentemente da largura do painel.
- No caso do Solo 2, a fase de betonagem do painel é tão desfavorável como a fase de escavação da própria vala, visto que a deformada da segunda fase pode atingir valores absolutos iguais ou superiores aos atingidos na primeira fase da instalação.
- É evidente que, tanto para o Solo 1 como para o Solo 2, a largura dos painéis instalados tem muita influência nos deslocamentos obtidos durante a construção da parede

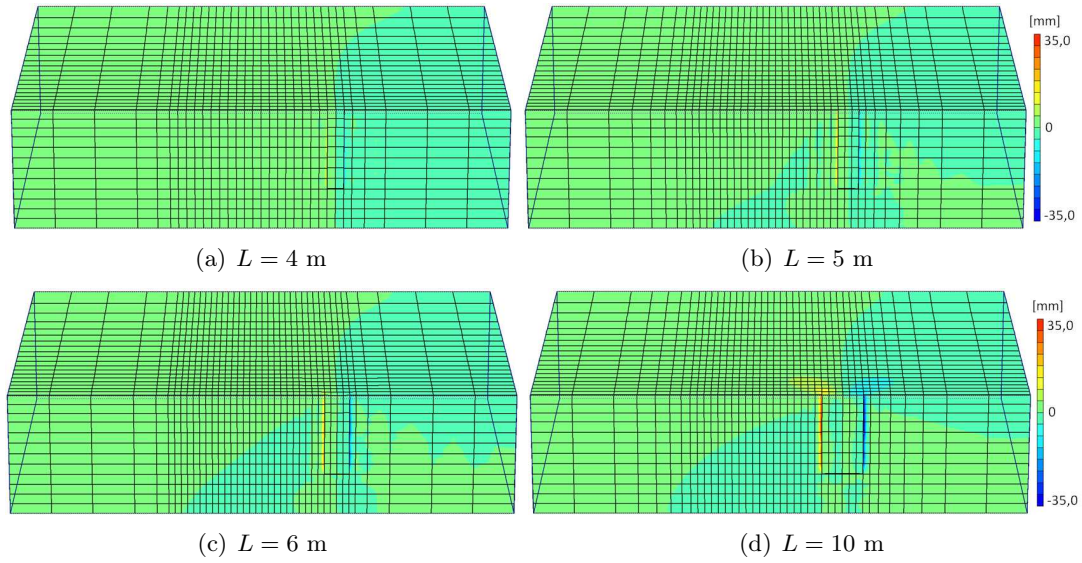


Figura 5.37: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , durante a escavação do primeiro painel (1ª Fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

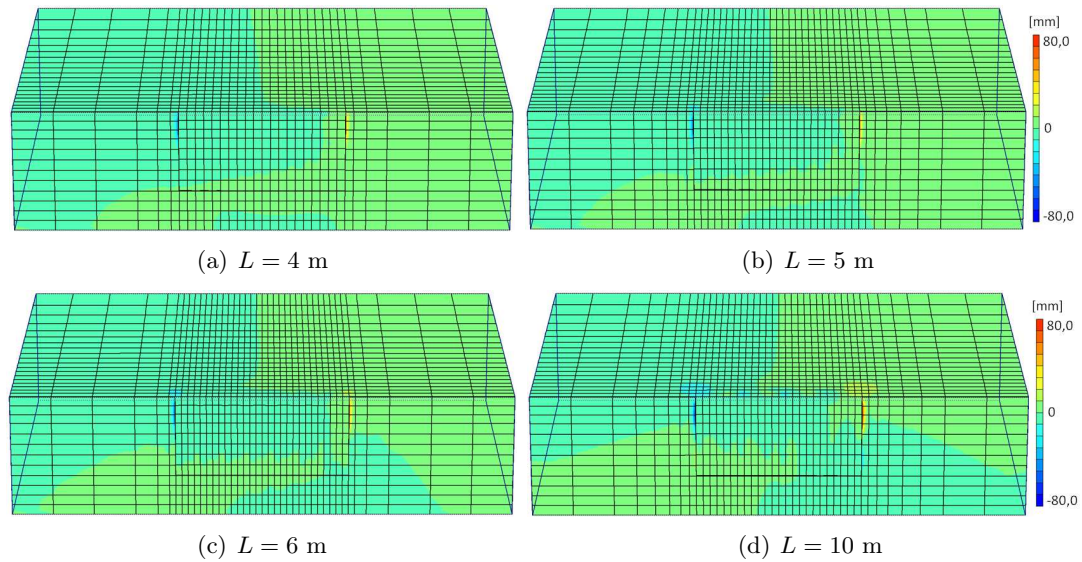


Figura 5.38: Deslocamento horizontal do maciço, na direcção do Z , no final da construção da parede (última fase), para painéis de várias larguras (L), no caso do Solo 2.

moldada. À medida que se aumenta a largura do painel, aumentam os deslocamentos horizontais dx e os verticais dy de forma significativa. Os deslocamentos horizontais dz também aumentam com a largura do painel, mas de forma menos pronunciada que os anteriores.

- Para o Solo 1 os deslocamentos no maciço aumentam linearmente com o aumento da largura dos painéis da parede. Para o Solo 2 estes aumentos são também dependentes, mas verificam-se maiores desenvolvimentos no último modelo, com maior largura, pois a diferença da sua largura de painel para os modelos a que se compara também é superior.
- Nos modelos apresentados, para o Solo 1 e 2, verifica-se que os maiores deslocamentos, (dx e dy), se observam no último painel instalado, independentemente da largura destes painéis.
- Comparando os Solos 1 e 2, pode-se afirmar que o Solo 2 apresenta maiores deformações do que o Solo 1. No entanto, os assentamentos à superfície do Solo 1 propagam-se numa maior distância do que os mesmos no Solo 2, para as larguras de painel estudadas.
- Em relação à progressão dos deslocamentos à medida que se aumenta a largura do painel, as Figuras 5.24 e 5.32 mostram que no Solo 1, o aumento da largura do painel produz aumentos mais significativos do que o mesmo no Solo 2, mesmo que o último apresente maiores valores de deslocamentos.

5.5 Influência da espessura da parede

Nesta secção pretende-se estudar a influência da espessura da parede no resultado dos movimentos do maciço durante a instalação de uma parede moldada com 40 m de largura, constituída por oito painéis de 5 m.

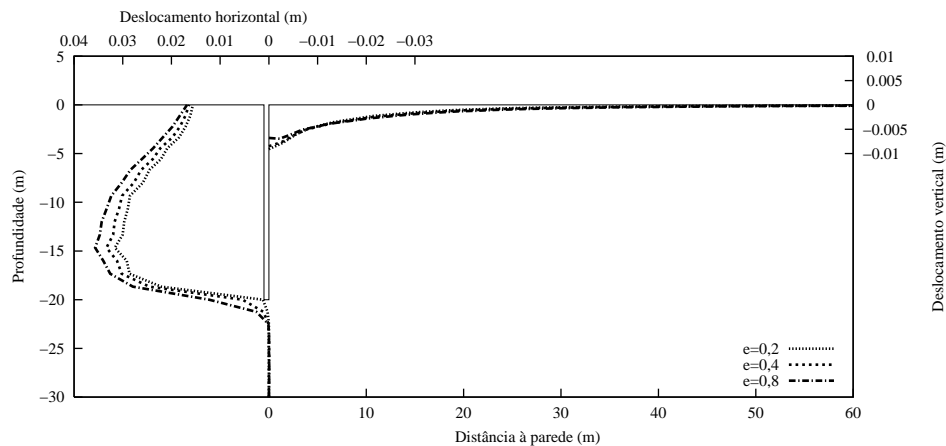
Foram modelados 6 casos: para o Solo 1 e 2, com espessuras de parede de 0,2 m, 0,4 m e 0,8 m. Considerando a modelação por simetria, está-se a representar paredes com o dobro da espessura modelada.

5.5.1 Solo 1

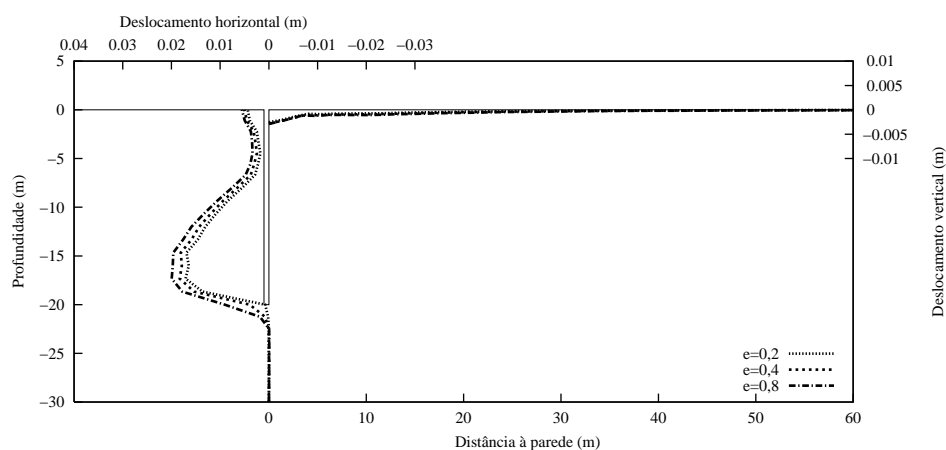
Deslocamentos horizontais do solo e assentamentos na superfície do maciço

Analisando as Figuras 5.39 e 5.40 pode-se observar que para o Solo 1 o aumento da espessura da parede aumenta os deslocamentos do maciço (dx e dy). Isto verifica-se porque para larguras maiores é necessário remover maior quantidade de solo para abrir a vala, originando maior descompressão do maciço. No entanto, a variação dos resultados para os três modelos é muito pequena, concluindo-se que a espessura do painel instalado tem pouca influência para os deslocamentos do maciço durante a instalação da parede.

Este comportamento é idêntico nas fases de escavação e betonagem, seja na construção do primeiro ou último painel da parede.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

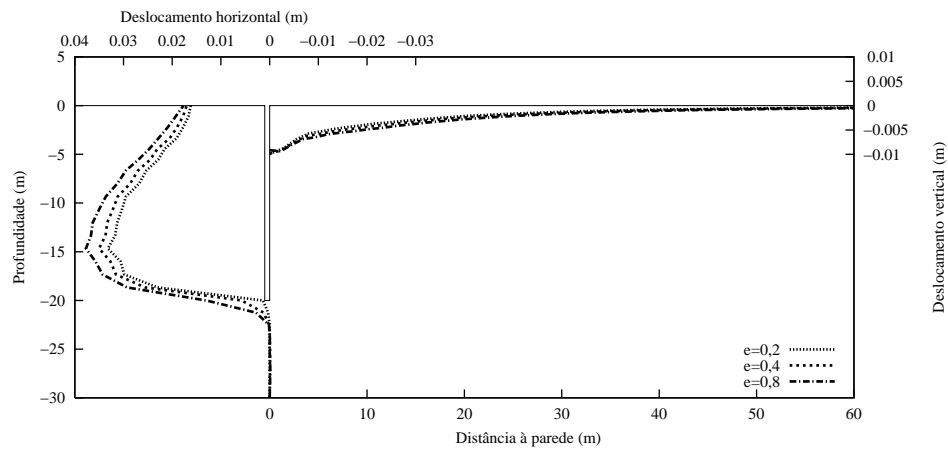
Figura 5.39: Deslocamento horizontal do solo no tardoz da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro painel da parede, para o Solo 1.

5.5.2 Solo 2

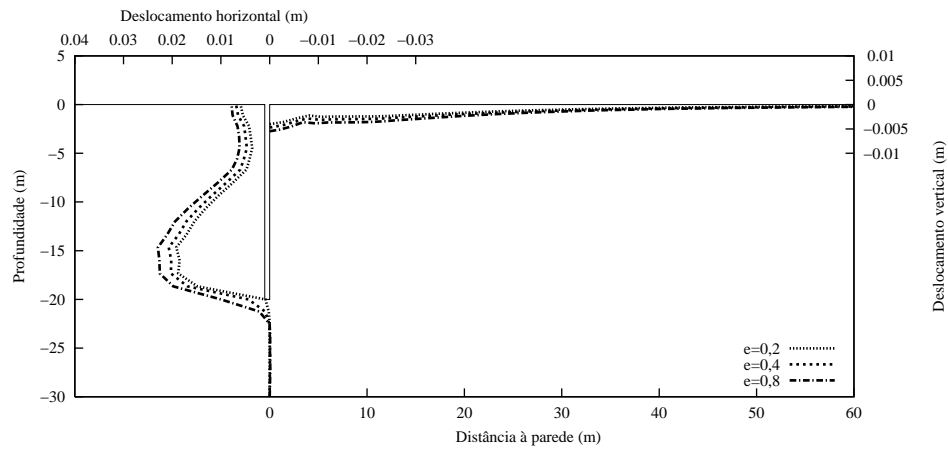
Deslocamentos horizontais do solo e assentamentos na superfície do maciço

Na análise de três modelos, com variação da espessura da parede instalada num maciço constituído pelo Solo 2, obtiveram-se os resultados ilustrados nas Figuras 5.41 e 5.42.

Durante a instalação do primeiro painel, escavação e betonagem, a variação da espessura do painel tem pouca influência nos deslocamentos do maciço. Estes aumentam com o aumento da espessura da parede, mas, assim como o verificado no Solo 1, a sua variação é pequena. Para a construção do último painel, a Figura 5.42 mostra que esta variação se torna ainda mais pequena, concluindo que, para este tipo de solo a espessura da parede tem pouca influência nos resultados da instalação da parede.

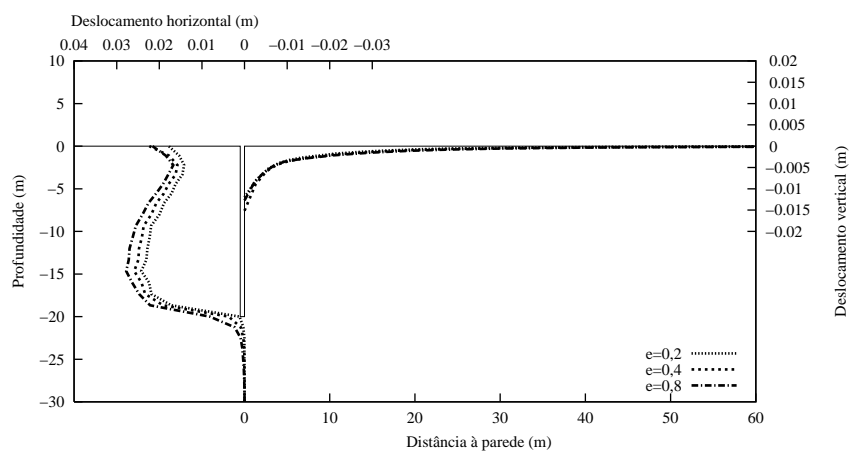


(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

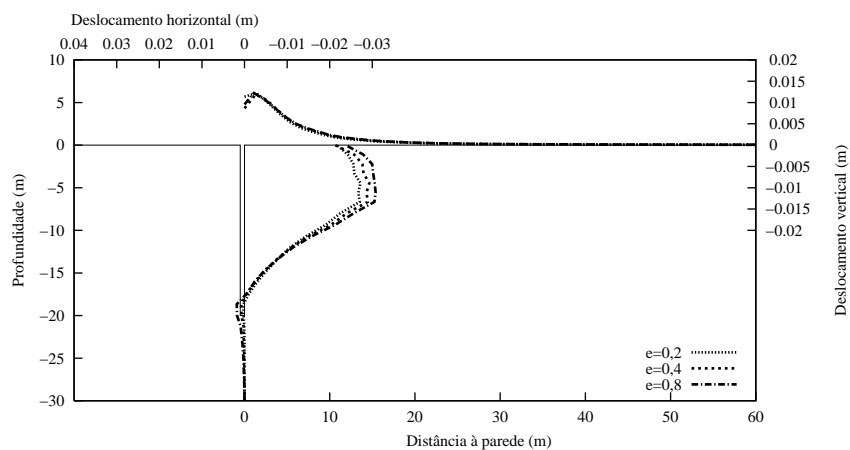


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.40: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 1.

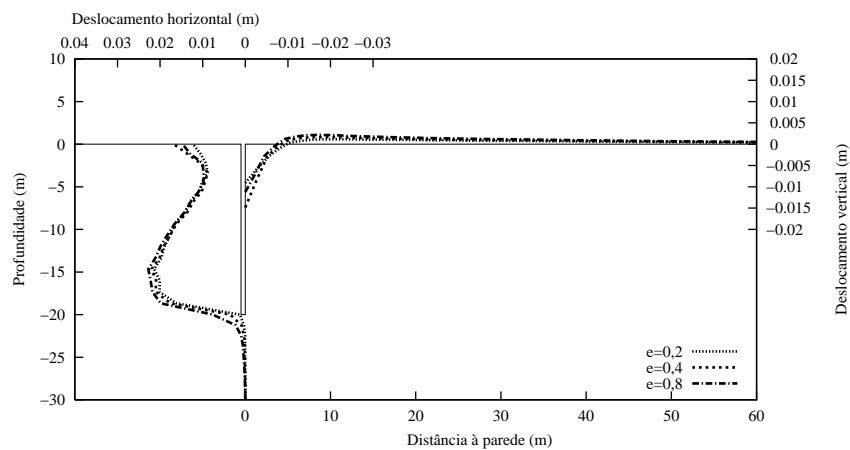


(a) Fase 1 - Escavação e bentonite

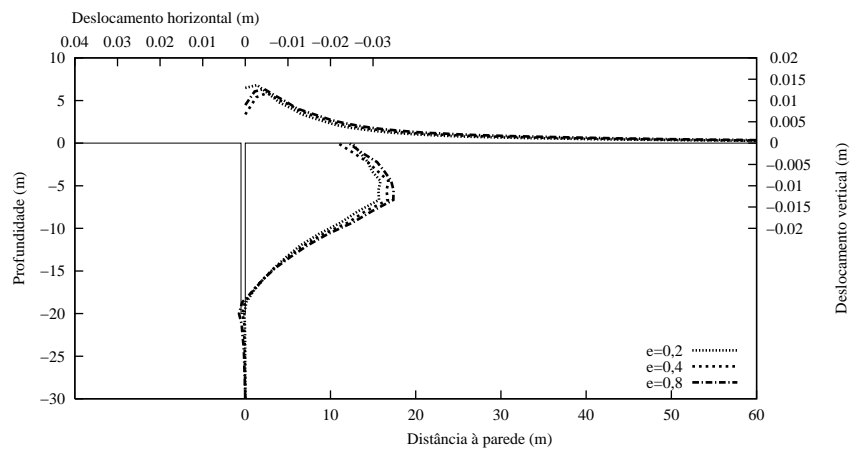


(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.41: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do primeiro painel da parede, para o Solo 2.



(a) Fase 1 - Escavação e bentonite



(b) Fase 2 - Betão fresco

Figura 5.42: Deslocamento horizontal do solo no tardo da parede e assentamento da superfície do maciço, para as duas fases de instalação do último painel da parede, para o Solo 2.

5.5.3 Conclusões

Em comparação com as secções anteriores, pode-se concluir que a espessura da parede é o factor que menos influencia os resultados dos deslocamentos no maciço, quando se instala uma parede moldada. Este facto verifica-se para ambos os solos estudados. No entanto, mesmo influenciando pouco, verifica-se que os deslocamentos do maciço são maiores para painéis com maior espessura, independentemente da fase de construção da parede.

5.6 Conclusões

Deste capítulo pode-se concluir que os factores escolhidos para estudar influenciam os deslocamentos do maciço pela seguinte ordem decrescente: tipo de solo; tensões iniciais do solo; largura dos painéis instalados; e espessura da parede instalada.

Em todas as secções deste capítulo verificou-se que o Solo 2 tende a deformar-se muito mais que o Solo 1 face às mesmas condições de modelação (processo de construção e geometria da parede). No entanto, o Solo 1 apresenta sempre maiores áreas deformadas, pelo que se prevê que os processos de transferência de carga sejam mais significativos para o Solo 1.

O comportamento do maciço é idêntico para os dois solos durante as duas fases de instalação da parede. Durante a escavação da vala e colocação das lamas bentoníticas os maciços apresentam deformação da parede para o interior da vala, assim como assentamentos à superfície.

Na fase em que se betona o painel o deslocamento do solo é directamente dependente das tensões iniciais instaladas, sendo que para valores de K_0 altos (1,0, 1,5 e 2,0) os deslocamentos horizontais dão-se para o interior da vala e a superfície do terreno tende a assentar, e para K_0 baixos (0,5 e 0,7) a face da vala desloca-se para o interior do maciço, comprimindo-o e dando origem a empolamentos superficiais.

Para os dois solos estudados verificou-se que, tendo instaladas tensões iniciais altas, prevê-se que a fase de construção mais desfavorável é durante a escavação da vala e colocação da bentonite. No entanto, para os mesmos solos, com tensões iniciais baixas, a fase com maiores deslocamentos é a fase de betonagem da parede.

Quanto às dimensões dos painéis da parede instalada verificou-se que a largura deste tem muita influência nos deslocamentos previstos do maciço. Em contra-partida, a espessura do painel faz variar muito pouco os resultados.

Para solos do tipo do Solo 2, e face aos resultados obtidos, conclui-se que não devem ser construídas paredes com larguras superiores a 10 m, pois correriam um risco significativo de colapsar durante a sua instalação. Para solos do tipo do Solo 1 o painel instalado poderá ter uma largura superior, sendo que para controlar a deformação do solo se aconselhem larguras razoáveis.

Capítulo 6

Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

A modelação numérica, em especial a modelação por elementos finitos é, presentemente, recurso frequente no projecto de escavações em meio urbano, suportadas por estruturas de contenção flexíveis. Na maior parte dos casos, a modelação tradicional deste tipo de estruturas parte de uma situação inicial, em que a cortina se encontra já instalada no terreno, antes do início da escavação geral propriamente dita. O caso das paredes moldadas não são excepção.

A execução de uma parede moldada, no entanto, produz no terreno envolvente efeitos que podem, em determinadas circunstâncias, ser importantes, e que se traduzem por deslocamentos e alterações ao estado de tensão inicial. No presente trabalho procurou, inicialmente, comparar-se a modelação de uma escavação realizada ao abrigo de uma parede moldada escorada usando dois tipos de modelos: o *WIP* (wished in place) em que se admite que, no início da modelação, a parede se encontra instalada e não teve efeitos sobre o maciço envolvente, e o *WIM* (wall installation modelled), em que tais efeitos são considerados. Esta parte do trabalho foi realizada em condições 2D, em estado plano de deformação, admitindo, portanto, que a parede moldada consistia numa estrutura muito longa e que, no caso da modelação *WIM*, que a execução da parede implicava a realização de uma vala muito longa, estabilizada com bentonite, seguindo-se o preenchimento com betão e o seu endurecimento. Esta parte do estudo procurou reproduzir cálculos realizados em trabalho anteriormente publicado e teve, sobretudo, como objectivo a validação dos procedimentos de modelação usados.

No que diz respeito a esses procedimentos, refere-se, em especial, a técnica usada, baseada em trabalhos publicados por outros autores, para a modelação da execução da parede, que decorre em duas fases: numa primeira, realiza-se em simultâneo a escavação da vala e o

seu preenchimento com bentonite e, numa segunda fase, procede-se à substituição da bentonite pelo betão fresco. No que respeita à modelação, a primeira fase consiste na modelação da escavação (por anulação da rigidez dos elementos na zona da vala e por aplicação das fronteiras desta das tensões iguais – mas com sinal contrário – às inicialmente instaladas) e na aplicação de um diagrama de pressões hidrostáticas, representando a colocação das lamas bentoníticas. A segunda fase consiste na substituição do diagrama hidrostático por um diagrama correspondente à colocação do betão fresco, considerado por diversos autores com uma distribuição bi-linear, que foi a adoptada. O endurecimento do betão é considerado na fase seguinte, a primeira da escavação geral, em que no espaço interior da vala são, de novo, considerados elementos, com a rigidez pretendida para o betão.

O estudo realizado permitiu concluir que a construção da parede moldada, quando modelada bidimensionalmente, causa transferência de carga na direcção vertical e que há importantes efeitos nos deslocamentos, em especial quando há diferenças significativas entre as tensões iniciais e as da bentonite. Permitiu igualmente concluir que, em condições 2D, a consideração dos efeitos da instalação da parede pode afectar significativamente os deslocamentos do maciço suportado e as cargas nas escoras.

A realização de análises tridimensionais foi validada procurando reproduzir com o modelo 3D simulando condições 2D em estado plano de deformação, os resultados anteriormente obtidos. Após a validação, procurou modelar-se a execução de um painel de parede moldada isolado, de forma tridimensional. Considerou-se, assim, um quarto do problema em causa, correspondendo a um quarto, em planta, do painel e do solo envolvente. Os efeitos da transferência de tensões puderam, então, ser verificados nas direcção vertical, para o solo que se situa abaixo do painel, e na direcção horizontal, para o solo ao lado do painel. Os deslocamentos obtidos são substancialmente menores do que os correspondentes em estado plano de deformação, o que mostra a esperada importância dos efeitos tridimensionais.

Verifica-se igualmente que os deslocamentos do maciço na zona dos últimos painéis a serem construídos são maiores do que os da primeira zona.

O estudo paramétrico tridimensional realizado versou sobre os seguintes parâmetros: coeficiente de impulso em repouso; largura dos painéis de parede moldada; espessura da parede moldada.

Em relação ao coeficiente de impulso, constatou-se que, na fase de escavação, os movimentos foram sempre para o interior da vala. Na fase de betonagem verificou-se que para coeficientes de impulso elevados os deslocamentos horizontais dão-se para o interior da vala e que para coeficientes de impulso baixos os deslocamentos são no sentido contrário, comprimindo-o e dando origem a empolamentos superficiais.

A largura do painel executado tem grande influência nos deslocamentos; nas dimensões mais habituais – entre 4 e 6 m – os deslocamentos são relativamente contidos.

A espessura da parede, pelo menos para os valores relativamente baixos adoptados, revelou-se com pouca importância nos efeitos no maciço.

6.2 Desenvolvimentos futuros

O estudo realizado permitiu constatar que os deslocamentos finais no caso de os coeficientes de impulso em repouso serem relativamente baixos são no sentido do terreno. Julga-se que tal efeito deve ser analisado com maior rigor do que o que foi possível fazer no presente trabalho. Em primeiro lugar, deverá procurar modelar-se o terreno com modelos de comportamento que permitam considerar a evolução não linear entre tensões e deformações. Com efeito, dado que o modelo adoptado foi elástico-perfeitamente plástico, o módulo na carga foi considerado igual ao módulo na descarga. Tal não corresponde, no entanto, ao comportamento real dos solos e deverá ter influenciado os resultados dos deslocamentos obtidos. Em segundo lugar, os modelos adoptados consideraram que o coeficiente de impulso em repouso era constante em profundidade, o que não deverá corresponder à situação real nos casos de solos normalmente consolidados. Para a consideração realista do efeito da sobreconsolidação nos solos deve ser a analisada e adoptada nos modelos a variação do coeficiente de impulso em repouso com a profundidade. Em terceiro lugar, deve procurar-se comparar o comportamento constatado – e o que venha a constatar-se com os modelos referidos – com situações reais de execução de painéis de parede moldada em que os deslocamentos devidos à construção sejam medidos, assim como as variações de tensão no maciço.

Os resultados obtidos dos cálculos tridimensionais verificaram alguma importância da ordem pela qual os painéis são executados. Parece, assim, adequado explorar-se esta questão um pouco mais detalhadamente, considerando outras opções de execução da parede para além da sequencial adoptada no presente trabalho, com destaque para a opção pela execução de painéis alternados, também frequente na execução de paredes moldadas.

Refere-se, finalmente, que a parte tridimensional do trabalho realizado versou apenas sobre a execução da parede moldada propriamente dita, sem que se tivesse procurado modelar o restante faseamento construtivo, em especial o que decorreria da escavação geral que normalmente estará associada à construção de uma parede moldada.

Referências Bibliográficas

- Clayton, C. R. I. e Milititsky, J. (1983). Installation effects and the performance of bored piles in stiff clay. *Ground Engineering*, 16(2):17–22. Obra não consultada directamente; referida em Ng et al. (2004).
- Faria, P. e Guerra, N. (2008). Análise numérica dos efeitos de instalação de paredes moldadas no terreno. Em *XI Congresso Nacional de Geotecnia*, volume 2, páginas 35–42.
- Farmer, J. W. e Attewell, P. B. (1973). Ground movements caused by a bentonite-supported excavation in London Clay. *Géotechnique*, 23(4):576–581.
- Gourvenec, S. M. e Powrie, W. (1999). Three-dimensional finite-element analysis of diaphragm wall installation. *Géotechnique*, 49(6):801–823.
- Gunn, M. J. e Clayton (1992). Installation effects and their importance in the design of earth-retaining structures. *Géotechnique*, 42(1):137–141.
- Lings, M. L., Ng, C. W. W., e Nash, D. F. T. (1994). The lateral pressure of wet concrete in diaphragm wall pannels cast under bentonite. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 107:163–172.
- Ng, C. W. W. (1992). *An evaluation of soil-structure interaction associated with a multi-propped excavation*. Tese de Doutoramento, Universidade de Bristol. Obra não consultada directamente; referida por Ng et al. (2004).
- Ng, C. W. W. e Lings, M. L. (1995). Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back-analysis of a deep excavation in stiff clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 121(10):687–695. Obra não consultada directamente; referida por Ng et al. (2004).
- Ng, C. W. W., Lings, M. L., Simpson, B., e Nash, D. F. T. (1995). An approximate analysis of the three-dimensional effects of a diaphragm wall installation. *Géotechnique*, 45(3):497–507.
- Ng, C. W. W., Simons, N., e Menzies, B. (2004). *A short course in soil-structure engineering of deep foundations, excavations and tunnels*, capítulo 17, 18, 20 e 21. Thomas Telford.
- Ng, C. W. W. e Yan, R. W. M. (1998). Stress transfer and deformation mechanisms around a diaphragm wall panel. *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 124(7):638–648.

- Ng, C. W. W. e Yan, R. W. M. (1999). Three-dimensional modelling of a diaphragm wall construction sequence. *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 49(6):825–834.
- Ou, C. Y., Chiou, D. C., e Wu, T. S. (1996). Three-dimensional finite-element analysis of deep excavations. *Journal of Geotechnical Engineering (ASCE)*, 122(5):337–345.
- Poh, T. Y., Goh, T. C., e Wong, I. H. (2001). Ground movements associated associated with wall construction: case histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 127(12):1061–1069.
- Poh, T. Y. e Wong, I. H. (1998). Effects of construction of diaphragm wall panels on adjacent ground: field trial. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, 124(8):749–756.
- Powrie, W. e Kantartzi, C. (1996). Ground response during diaphragm wall installation in clay: centrifuge model tests. *Géotechnique*, 46(4):725–739. Obra não consultada directamente; referida por Gourvenec e Powrie (1999).
- Powrie, W. e Li, E. S. F. (1991). Finite element analyses of an in situ wall propped at formation level. *Géotechnique*, 41(4):499–514.
- Schafer, R. e Triantafyllidis, T. (2004). Modelling of earth and water pressure development during diaphragm wall construction. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28:1305–1326.
- Schafer, R. e Triantafyllidis, T. (2006). The influence of the construction process on the deformation behaviour of diaphragm walls in soft clayey ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30:563–576.
- Sousa, R., Teixeira, R., e Guerra, J. (2006). Dimensionamento e execução de paredes moldadas. *série Estruturas, IST*.